UNIVERSIDAD DE LEÓN

Instituto de Investigación de la Viña y el Vino

Evolución de las relaciones nutricionales suelo-planta desarrolladas en suelos de la D.O. "Tierra de León" dedicados al cultivo de *Vitis vinifera* L. cv. Prieto Picudo

Miguel A. Olego Morán

León, 2011

UNIVERSIDAD DE LEÓN

Instituto de Investigación de la Viña y el Vino

Evolución de las relaciones nutricionales suelo-planta desarrolladas en suelos de la D.O. "Tierra de León" dedicados al cultivo de *Vitis vinifera* L. cv. Prieto Picudo

Miguel A. Olego Morán

León, 2011

La realización de esta tesis doctoral, ha sido posible gracias a la concesión de una beca de formación de personal investigador por parte de la **Excma. Diputación Provincial de León**, en acuerdo de Junta de Gobierno de la Corporación, en sesión celebrada el día 11 de mayo de 2007.

Sirvan estas líneas para mostrar mi agradecimiento.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN....1

1.1 DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS NUTRIENTES VEGETALES 3
1.2 ABSORCIÓN DE LOS NUTRIENTES MINERALES POR LAS PLANTAS 7
1.2.1 Los nutrientes minerales en el medio edáfico 7
1.2.1.1 Disponibilidad de los nutrientes minerales en función de la edad del medio edáfico 7
1.2.1.2 Potencialidad del medio edáfico en el suministro de nutrientes minerales....8
1.2.1.3 Movimiento de los nutrientes minerales hacia la superficie radicular....9
1.2.2 Atributos determinantes del sistema radicular en la absorción de los nutrientes minerales ...11
1.3 LOS NUTRIENTES MINERALES DE LAS PLANTAS 12
1.3.1 Nitrógeno 12
1.3.1.1 Nitrógeno en el sistema suelo-planta 12
1.3.1.2 Funciones en la planta....15
1.3.1.3 Interacciones nutricionales 15
1.3.2 Fósforo 16
1.3.2.1 Fósforo en el sistema suelo-planta....16
1.3.2.2 Funciones en la planta....18
1.3.2.3 Interacciones nutricionales 19
1.3.3 Potasio 19
1.3.3.1 Potasio en el sistema suelo-planta 19
1.3.3.2 Funciones en la planta....20
1.3.3.3 Interacciones nutricionales 22
1.3.4 Calcio 22
1.3.4.1 Calcio en el sistema suelo-planta 22
1.3.4.2 Funciones en la planta....23
1.3.4.3 Interacciones nutricionales 24
1.3.5 Magnesio 25
1.3.5.1 Magnesio en el sistema suelo-planta....25
1.3.5.2 Funciones en la planta....25
1.3.5.3 Interacciones nutricionales 26
1.3.6 Azufre....27
1.3.6.1 Azufre en el sistema suelo-planta....27
1.3.6.2 Funciones en la planta....29
1.3.6.3 Interacciones nutricionales 30
1.3.7 Zinc 30
1.3.7.1 Zinc en el sistema suelo-planta 30
1.3.7.2 Funciones en la planta....32
1.3.7.3 Interacciones nutricionales 33
1.3.8 Cobre 34
1.3.8.1 Cobre en el sistema suelo-planta 34
1.3.8.2 Funciones en la planta....35
1.3.8.3 Interacciones nutricionales 36
1.3.9 Hierro....36
1.3.9.1 Hierro en el sistema suelo-planta....36
1.3.9.2 Funciones en la planta....38
1.3.9.3 Interacciones nutricionales 39
1.3.10 Manganeso 40
1.3.10.1 Manganeso en el sistema suelo-planta....40
1.3.10.2 Funciones en la planta....41
1.3.10.3 Interacciones nutricionales 42
1.3.11 Boro 43
1.3.11.1 Boro en el sistema suelo-planta 43
1.3.11.2 Funciones en la planta....44

1.3.11.3 Interacciones nutricionales 44
1.3.12 Aluminio *45*
1.3.12.1 Aluminio en el sistema suelo-planta 45
1.3.12.2 Interacciones nutricionales 50
1.4 ESPECIES Y VARIEDADES DE VID 53
1.4.1 El género Vitis *53*
1.4.2 La especie Vitis vinifera L. *53*
1.5 EL CULTIVAR PRIETO PICUDO 55
1.6 ASPECTOS NUTRICIONALES EN *VITIS VINIFERA* L. 56

2. OBJETIVOS 64

3. MATERIALES Y MÉTODOS 68

3.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO 70
3.2 LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE MUESTREO 71
3.3 MÉTODOS DE CAMPO 72
3.3.1 Toma de muestras de suelo *72*
3.3.2 Toma de muestras de material vegetal (limbos y peciolos) *72*
3.3.3 Toma de muestras de sarmientos *72*
3.4 MÉTODOS DE LABORATORIO 72
3.4.1 Técnicas empleadas en suelos *72*
3.4.1.1 Determinación de la clase textural 73
3.4.1.2 pH en agua 73
3.4.1.3 pH en KCl 73
3.4.1.4 Conductividad eléctrica 73
3.4.1.5 Materia orgánica 74
3.4.1.6 Bases de cambio (Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^{+}) 74
3.4.1.7 Fósforo soluble en bicarbonato sódico (Método Olsen - Watanabe) 74
3.4.1.8 Micronutrientes (Fe^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+} y Mn^{2+}) 74
3.4.1.9 Aluminio de cambio 75
3.4.2 Técnicas empleadas en material vegetal (limbos y peciolos) *75*
3.4.3 Técnicas empleadas en sarmientos *75*
3.5 MÉTODOS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS 75
3.5.1 Análisis de componentes principales *76*
3.5.1.1 Los Factores (Componentes) 76
3.5.1.2 Extracción de los componentes 78
3.5.1.3 Rotación de los componentes: perfeccionando la interpretación 79
3.5.1.4 La importancia de las puntuaciones en los componentes 80
3.5.2 Análisis de correlación canónica *80*
3.5.3 Regresión lineal múltiple *80*
3.5.3.1 El modelo lineal general 80
3.5.3.2 El análisis de regresión lineal 80
3.5.3.3 El modelo de regresión lineal múltiple 81
3.5.3.4 Estimación de los coeficientes 82
3.5.3.5 El método de los mínimos cuadrados 83
3.5.3.6 Evaluación de los predictores 85
3.5.3.7 El problema de la multicolinealidad 86

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 90

4.1 CONCEPTUALIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE DATOS 92
4.2 DESCRIPTIVOS Y CONTRASTES DE NORMALIDAD 94
4.3 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES. PARÁMETROS EDÁFICOS 97
4.3.1 KMO y prueba de esfericidad de Bartlett en parámetros edáficos *97*

4.3.2 Extracción de componentes en parámetros edáficos *98*
4.3.3 Matriz de componentes en parámetros edáficos *99*
4.3.4 Discusión agronómica de los componentes extraídos en parámetros edáficos *101*
4.3.5 Análisis de correlación canónica en parámetros edáficos *107*
4.4 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES. NUTRIENTES LIMBO 109
4.4.1 KMO y prueba de esfericidad de Bartlett en nutrientes limbo *109*
4.4.2 Extracción de componentes en nutrientes limbo *109*
4.4.3 Matriz de componentes en nutrientes limbo *110*
4.4.4 Discusión agronómica de los componentes extraídos en nutrientes limbo *111*
4.5 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES. NUTRIENTES PECIOLO 113
4.5.1 KMO y prueba de esfericidad de Bartlett en nutrientes peciolo *113*
4.5.2 Extracción de componentes en nutrientes peciolo *114*
4.5.3 Matriz de componentes en nutrientes peciolo *115*
4.5.4 Discusión agronómica de los componentes extraídos en nutrientes peciolo *115*
4.6 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES. NUTRIENTES SARMIENTOS 117
4.6.1 KMO y prueba de esfericidad de Bartlett en nutrientes sarmientos *117*
4.6.2 Extracción de componentes en nutrientes sarmientos *118*
4.6.3 Matrices de componentes en nutrientes sarmientos *119*
4.6.4 Discusión agronómica de los componentes extraídos en nutrientes sarmientos *120*
4.7 PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE 122
4.7.1 Exposición de los diversos modelos de regresión objeto de estudio *122*
4.7.2 Visión global de los modelos de regresión objeto de estudio *123*
4.7.3 Coeficientes de regresión en los modelos de regresión objeto de estudio *124*
4.7.4 Diagnósticos de colinealidad para los modelos de regresión objeto de estudio *125*
4.7.5 Estadísticos residuales en los modelos de regresión objeto de estudio *126*
4.7.6 Histogramas de residuos y gráficos de dispersión en los modelos de regresión objeto de estudio *129*
4.8 VALORACIÓN AGRONÓMICA DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN 130
4.8.1 Variable Dependiente: Ca Peciolo; Variables Independientes: Ca Limbo y Fe Limbo *130*
4.8.2 Variable Dependiente: Mg Peciolo; Variables Independientes: Mg Limbo y Cu Limbo *133*
4.8.3 Variable Dependiente: Zn Peciolo; Variables Independientes: Mg Limbo y Cu Limbo *135*
4.8.4 Variable Dependiente: Cu Peciolo; Variables Independientes: Cu Limbo y Mg Limbo *136*
4.8.5 Variable Dependiente: K Peciolo; Variables Independientes: K Limbo, Arcilla y Mg edáfico *137*
4.8.6 Variable Dependiente: Mn Peciolo; Variables Independientes: Mn Limbo *141*
4.8.7 Variable Dependiente: B Peciolo; Variables Independientes: B Limbo y P Limbo *141*
4.8.8 Variable Dependiente: P Peciolo; Variables Independientes: Ca edáfico *143*
4.8.9 Variable Dependiente: Mn Peciolo; Variables Independientes: Mn Limbo, Ca edáfico y C.E. *145*
4.9 EVALUACIÓN DE FIABILIDAD DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN 146

5. CONCLUSIONES **149**

6. BIBLIOGRAFÍA **154**

ANEXO I. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE SUELOS **181**

ANEXO II. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LIMBOS **190**

ANEXO III. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE PECIOLOS **196**

ANEXO IV. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE SARMIENTOS **202**

ANEXO V. GRÁFICOS DE CONTRASTE DE PRESUNCIÓN DE NORMALIDAD **208**

ANEXO VI. MATRICES DE COMPONENTES ROTADOS Y SIN ROTAR **234**

ANEXO VII. MATRICES DE CORRELACIONES.....245

1. INTRODUCCIÓN

1.1 DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS NUTRIENTES VEGETALES

Nutriente vegetal, se define como aquel elemento químico que es esencial para el desarrollo y la reproducción vegetal. Elemento esencial, es un término empleado a menudo para identificar a los nutrientes vegetales. Si consideramos que el término nutriente implica esencialidad, resulta redundante denominar a estos elementos como nutrientes esenciales. El principal criterio empleado para definir a un elemento como nutriente vegetal, es que dicho elemento sea requerido por la planta para completar su ciclo de vida. El segundo de los criterios empleados para emplear tal acepción, es que ningún otro elemento puede sustituir plenamente a ninguno de aquellos considerados como nutrientes vegetales. El tercer criterio de esencialidad, es que todas las especies vegetales requieran de dicho nutriente vegetal. No obstante, no todos los elementos que han sido identificados como nutrientes vegetales, cumplen completamente con los tres criterios anteriormente mencionados.

El primero de los criterios, aquel por el cual se consideraba que el elemento era esencial para que el vegetal completara su ciclo de vida, incluye la propiedad de que el citado elemento tiene un efecto directo sobre el desarrollo de la planta y su reproducción. En ausencia de dicho elemento o ante condiciones de deficiencia severa, la planta moriría antes de completar su ciclo vital. Este criterio, advierte del hecho de que la mera presencia de un elemento en alguna de las estructuras del vegetal, no es evidencia de esencialidad.

El segundo de los criterios, establece que la función de un elemento debe de ser única en el metabolismo o fisiología vegetal, de tal forma que ningún otro elemento podrá sustituir completamente al primero para desarrollar plenamente la función acometida por este último. Una sustitución parcial puede sin embargo ser posible; así por ejemplo la sustitución del manganeso por el magnesio en determinadas reacciones enzimáticas es posible, pero ningún elemento puede sustituir al magnesio en su papel como constituyente de la clorofila (Marschner, 1995). Algunos científicos, consideran que este criterio se encuentra incluido en el contexto del primer criterio (Epstein y Bloom, 2005).

El tercer criterio requiere que la esencialidad se muestre de forma universal en el reino vegetal. No obstante, ciertos elementos pueden afectar al desarrollo vegetal sin que por ello sean considerados como elementos esenciales (Epstein y Bloom, 2005; Jones, 2000). Así, el hecho de que un elemento refuerce el desarrollo vegetal, no es una característica definitiva para ser considerado como nutriente vegetal, de tal forma que el hecho de que la estimulación del desarrollo vegetal pueda ser provocada por un elemento, no incluya que este elemento sea requerido para que la planta complete su ciclo vital. Así, todos aquellos elementos que acentúen el desarrollo vegetal, reciben la denominación de elementos beneficiosos; la misma acepción recibe todos aquellos elementos que cumplen alguna función fisiológica en alguna especie vegetal, no se manifiesta de forma universal.

Diecisiete elementos cumplen los criterios de esencialidad que se otorgan a los considerados como nutrientes vegetales. Carbono, hidrógeno y oxígeno, son obtenidos desde el aire y el agua. Los otros catorce, denominados como nutrientes minerales, (**Tabla nº 1**), son obtenidos, principalmente en forma de iones inorgánicos

desde la solución del suelo. Aunque los nutrientes minerales forman parte de un ciclo continuo que se desarrolla a través de todos los seres vivos, su entrada en la biosfera se realiza de forma predominante a través del sistema radicular de las especies vegetales (Epstein, 1999). La gran superficie del sistema radicular vegetal y su aptitud para la absorción de iones inorgánicos que se encuentran en bajas concentraciones en la solución del suelo, hacen que el proceso de absorción radicular de nutrientes minerales por las plantas, sea un proceso de elevada eficiencia. Después de ser absorbidos por el sistema radicular, los nutrientes minerales son translocados a los diferentes tejidos vegetales, donde son empleados en numerosas funciones biológicas. Otros organismos, como las micorrizas y las bacterias fijadoras de N_2, participan con el sistema radicular de ciertas especies vegetales, en la adquisición de nutrientes minerales.

ELEMENTOS ESENCIALES MINERALES

Elemento	Fecha de aceptación de su esencialidad	Investigador
Nitrógeno	1804	de Saussure[a]
	1851-1855	Boussingault[a]
Fósforo	1839	Liebig[b]
	1861	Ville[a]
Potasio	1866	Birner & Lucanus[a]
Calcio	1862	Stohmann[a]
Magnesio	1875	Boehm[a]
Azufre	1866	Birner & Lucanus[a]
Hierro	1843	Gris[b]
Manganeso	1922	McHargue[b]
Cobre	1925	McHargue[b]
Boro	1926	Sommer & Lipman[b]
Zinc	1926	Sommer & Lipman[b]
Molibdeno	1939	Arnon & Stout[b]
Cloro	1954	Broyer, Carlton, Johnson & Stout[b]
Níquel	1987	Brown, Welch & Cary

[a] Citado por Reed (1942)
[b] Citado por Chapman (1966)

Tabla nº 1: Elementos esenciales minerales para la nutrición vegetal. Adaptado de Barker y Pilbeam (2007)

Aquellos elementos que son requeridos por los vegetales en cantidades considerables (macronutrientes), generalmente se acumulan en una cantidad ≥ 0,1% de materia seca en los tejidos vegetales. La mayoría de los elementos requeridos en pequeñas cantidades por los vegetales (micronutrientes), generalmente se acumulan en una cantidad <0,01% de materia seca en los tejidos vegetales. Marschner (1995), agrupa como macronutrientes a N, P, K, S, Ca y Mg; por otra parte, y bajo el término de micronutrientes, agrupa a Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl y Ni.

Determinados investigadores, han argumentado que la clasificación de los nutrientes minerales en macronutrientes y micronutrientes, es difícil de justificar desde un punto de vista fisiológico. Mengel y Kirkby (1987), han propuesto que los elementos considerados como esenciales, sean clasificados en cuatro grupos, en función de su papel bioquímico y su función fisiológica (**Tabla nº 2**).

1. El primer grupo, está constituido por aquellos nutrientes que forman parte de los componentes orgánicos (carbono) de la planta. Las especies vegetales asimilan estos nutrientes a través de reacciones bioquímicas que involucran a procesos de oxidación y reducción.
2. El segundo grupo, es importante desde el punto de vista de las reacciones de acumulación de energía y en el mantenimiento de la integridad estructural. Los elementos de este grupo están a menudo presentes en los tejidos vegetales en forma de ésteres de fosfato, borato y silicato, en los cuales el vínculo con la molécula orgánica es el grupo hidroxilo.
3. El tercer grupo, está presente en los tejidos vegetales en forma de iones libres o vinculados a sustancias como lo ácidos pecticos presentes en la pared celular de las células vegetales. De particular importancia en este grupo, son las funciones como cofactores enzimáticos y la participación en la regulación de los potenciales osmóticos.
4. El cuarto grupo, presenta funciones importantes en las reacciones involucradas en la transferencia de electrones.

Nutrientes minerales	Funciones
Grupo I: N, S	Nutrientes que forman parte de los compuestos orgánicos de carbono.
Grupo II: P, Si, B	Nutrientes con funciones esenciales en el almacenamiento energético y en la integridad estructural.
Grupo III: K, Ca, Mg, Cl, Mn, Na	Nutrientes que permanecen en forma iónica.
Grupo IV: Fe, Zn, Cu, Ni, Mo	Nutrientes involucrados en las reacciones redox.

Tabla nº 2: Clasificación de los nutrientes minerales vegetales en base a su función bioquímica. Adaptada de Evans y Sorger (1966), y Mengel y Kirkby (1987).

Los elementos beneficiosos, pueden estimular el desarrollo vegetal o ser requeridos de forma exclusiva por ciertas plantas. El silicio, cobalto y sodio, son elementos beneficiosos con cierta notabilidad. El selenio, aluminio, vanadio y algún otro elemento, han sido apuntados como estimulantes del desarrollo vegetal (Epstein y Bloom, 2005; Asher, 1991). Algunos de estos elementos beneficiosos pueden ser clasificados en el futuro como elementos esenciales a medida que se pudiese llegar a demostrar que durante el proceso de desarrollo de los vegetales, estos no pueden completar su ciclo de vida si la concentración de estos elementos en los tejidos vegetales disminuyen por debajo de ciertos límites. El níquel, es un claro ejemplo de elemento clasificado inicialmente como beneficioso, pero que de forma reciente ha sido mostrado como esencial (Brown y Welch, 1987).

Las deficiencias en nutrientes minerales, desestabilizan el metabolismo y las funciones fisiológicas de las plantas, lo cual afecta de forma directa al desarrollo vegetal (**Figura nº 1**).

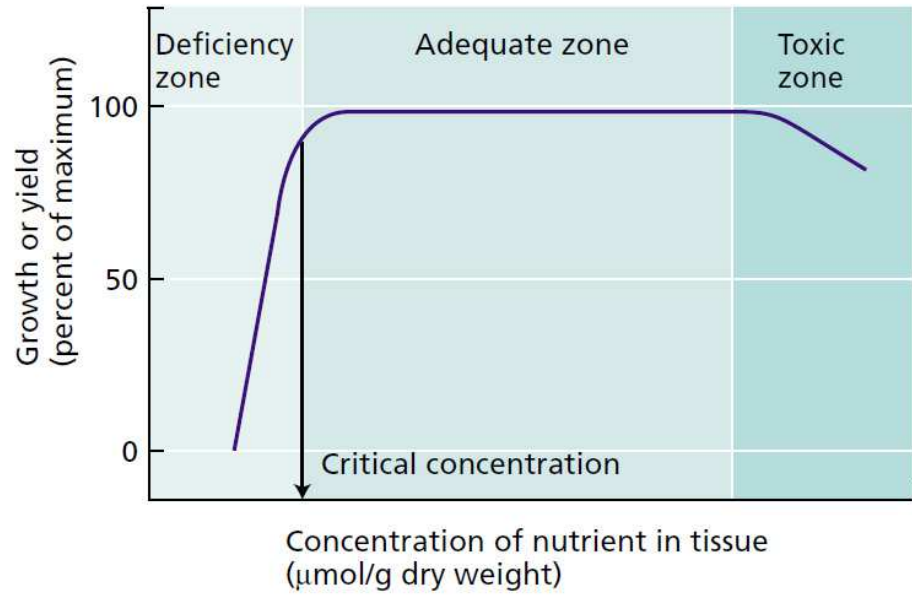


Figura nº 1: Relación entre el desarrollo (o producción de cosecha) y el contenido en nutrientes minerales en los tejidos vegetales. Tres zonas - deficiencia, adecuada y tóxica – son mostradas en el gráfico de la figura. Fuente: Taiz y Zeiger (2002).

Un suministro inadecuado de los nutrientes minerales esenciales, ocasiona un desorden nutricional, el cual se manifiesta por unos síntomas carenciales característicos. La diagnosis de estos síntomas carenciales en las plantas cultivadas en un entorno natural, puede resultar complejo por una serie de razones que se exponen a continuación:

- Pueden suceder de forma simultánea deficiencias, tanto de carácter crónico, como agudo.
- Tanto las deficiencias como las excesivas concentraciones de algún elemento mineral, pueden inducir acumulaciones excesivas o deficientes de algún otro elemento mineral.
- Determinados patógenos, pueden ocasionar síntomas muy similares a aquellos ocasionados por las deficiencias nutricionales.

Los síntomas ocasionados por la deficiencia de algún nutriente mineral, son la expresión de los desordenes metabólicos ocasionados por el insuficiente suministro de algún nutriente esencial. Si bien cada elemento esencial mineral participa en diferentes reacciones metabólicas, es posible realizar ciertas aseveraciones generales sobre las funciones que desempeñan los elementos esenciales minerales en el metabolismo de los vegetales. Así, de forma general, los nutrientes minerales esenciales participan en las funciones estructurales, metabólicas y de osmorregulación de las células vegetales. Funciones más específicas pueden asociarse a los cationes divalentes como el calcio y el magnesio, con su capacidad de modificar la permeabilidad de las membranas vegetales.

Cuando aparecen síntomas de deficiencia nutricional agudos para un nutriente mineral esencial, un indicio importante acerca de la naturaleza del

nutriente mineral esencial que provoca la sintomatología, es la magnitud por medio de la cual un nutriente mineral puede ser redistribuido desde las hojas maduras hasta las jóvenes. Así, determinados nutrientes minerales como el nitrógeno, el fósforo y el potasio, pueden desplazarse fácilmente de hoja a hoja; por el contrario, otros nutrientes minerales como el boro, el calcio y el hierro, son relativamente inmóviles en la mayoría de las especies vegetales (**Tabla nº 3**). Si un nutriente mineral esencial presenta movilidad, los síntomas de deficiencia tienden a aparecer en primer lugar en las hojas adultas. Por el contrario, los síntomas de deficiencia ocasionados por los nutrientes minerales esenciales con reducida movilidad, aparecerán en primer lugar sobre las hojas jóvenes. Aunque el mecanismo de movilización de los nutrientes minerales no se encuentra plenamente comprendido, parece ser que ciertas hormonas vegetales como las citoquininas parecen estar involucradas.

Nutrientes minerales	
Móviles	**Inmóviles**
Nitrógeno	Calcio
Potasio	Azufre
Magnesio	Hierro
Fósforo	Boro
Cloro	Cobre
Sodio	
Zinc	
Molibdeno	

Tabla nº 3: Nutrientes minerales clasificados en base a su movilidad en el interior de la planta y a su tendencia a ser retranslocados durante los períodos de estados carenciales. Fuente: Taiz y Zeiger (2002). Nota: los elementos nutritivos minerales, son situados en la tabla en orden de su abundancia en las plantas

1.2 ABSORCIÓN DE LOS NUTRIENTES MINERALES POR LAS PLANTAS

La mayoría de las especies vegetales, por medio de su sistema radicular, absorben los nutrientes minerales requeridos para su desarrollo del medio edáfico. La absorción de estos nutrientes minerales hacia el interior de las células del sistema radicular, se realiza a través de proteínas de transporte; no obstante, de forma previa a la descripción de estos mecanismos de transporte a través de la membrana plasmática, abordaremos el movimiento de los nutrientes minerales en el medio edáfico.

1.2.1 Los nutrientes minerales en el medio edáfico

1.2.1.1 Disponibilidad de los nutrientes minerales en función de la edad del medio edáfico

En escenarios edáficos relativamente jóvenes, subsiguientes a recientes períodos de glaciación o actividad volcánica, La biodisponibilidad del fósforo (P) es relativamente grande, mientras que el nitrógeno (N), tiende a ser el nutriente mineral crucial en términos limitantes para para el desarrollo vegetal. En escenarios edáficos con una gran antigüedad y sometidos a largos períodos de procesos erosivos, el fósforo (P) se constituye como nutriente limitante clave en el desarrollo vegetal. Las

cronosecuencias (gradientes de la edad del suelo en los cuales se observa como las propiedades del suelo son función directa de su edad) constituyen un modelo experimental a través del cual es posible el estudio de las causas de variación en la disponibilidad y en las formas en las cuales se presentan los nutrientes N y P (Walker y Syers, 1976; Vitousek, 2004), así como de las diferentes estrategias empleadas por las especies vegetales para acceder a las distintas formas en que se encuentran los nutrientes minerales (Lambers et al., 2008). Estas diferentes estrategias, amplian las opciones para la absorción de nutrientes procedentes de recursos edáficos, permitiendo a las plantas desarrollarse y competir en un amplio rango de condiciones, incluyendo dentro de estas, las existentes en aquellos suelos empobrecidos de forma extrema en su contenido en nutrientes minerales.

1.2.1.2 Potencialidad del medio edáfico en el suministro de nutrientes minerales

El material parental, así como la naturaleza de las rocas o sedimentos que dan origen al suelo actual, dan lugar a las proporciones de elementos nutritivos minerales potencialmente disponibles para las plantas. Diversos factores ecológicos (clima, vegetación y topografía) influencian poderosamente el tanto el régimen erosivo como el de pérdidas por lixiviación y, por lo tanto, la relación entre el material parental y la disponibilidad de nutrientes minerales (Jenny, 1980). La atmósfera, es la mayor fuente de N, a través de la fijación biótica del N_2 (asociaciones de tipo simbiótico) y de la deposición de nitratos y amonios por medio de los procesos de precipitación. La deposición atmosférica del P presenta dimensiones considerablemente menores respecto de la del N, pero puede ser de extrema importancia en aquellos entornos extremadamente empobrecidos en P (Brown et al., 1984; Soderberg y Compton, 2007). Otros aportes al medio que pueden ser realizados a través de la atmósfera son los siguientes: particularmente en las regiones costeras, el catión Na^+, cuyo origen principal es a través del transporte de sales marinas; otros cationes como el calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+), pueden ser aportados al medio también a traves del transporte atmosférico de polvo en suspensión (procedente de zonas desérticas, áreas agrícolas y vías de circulación no asfaltadas) y por medio de la polución atmosférica con origen en zonas industriales. Estos aportes atmosféricos, pueden presentar una importancia sustancial para ciertos ecosistemas particularmente empobrecidos en alguno de los elementos nutritivos minerales.

El pH del suelo, es el principal factor a la hora de determinar la biodisponibilidad de los nutrientes minerales en el medio edáfico (**Figura nº 2**). Moderadas concentraciones de iones hidrogeniones (H_3O^+), provocan un leve descenso en el pH del suelo, provocando un modesto incremento en el aporte de nutrientes minerales en el medio edáfico a través de una intensificación en los procesos de meteorización (Johnson et al., 1972), pero suele venir emparentado con una mayor pérdida de bases de cambio por lixiviación. Las precipitaciones de carácter ácido, son una reciente fuente de acidez para el medio edáfico a causa de las deposiciones de ácido nítrico y sulfúrico en el medio. Los protones (H_3O^+), en primer lugar, desplazan a los cationes de las sedes de intercambio del complejo arcillo húmico, de tal forma que los aniones sulfato (SO_4^{2-}) pueden desplazarse a través del perfil edáfico, llevandose consigo cationes de distinta naturaleza $(Ca^{2+}$,

Mg^{2+} y K^{+}), dejando atrás una predominancia en las sedes de intercambio de iones H_3O^{+}y Al^{3+} (Driscoll et al., 2001).

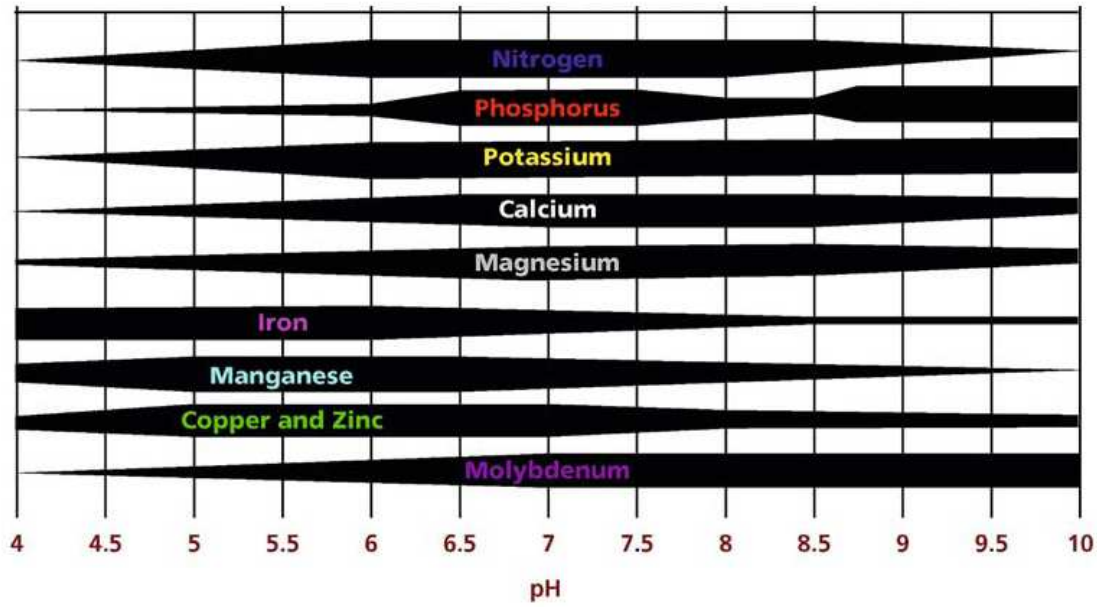


Figura nº 2: Influencia del pH sobre la biodisponibilidad de los nutrientes minerales. Fuente: Driscoll et al. (2001)

La biodisponibilidad de los iones presentes en el medio edáfico, también se ve afectada por el pH del suelo debido a la influencia que este muestra sobre sus estados de oxidación, sobre su solubilidad o sobre los procesos biológicos que dan lugar a formas bioasimilables. A corto plazo, los procesos de transformación que sufren los nutrientes que forman parte de la materia orgánica del suelo, son la fuente principal de nutrientes minerales solubles en el medio edáfico (**Tabla nº 4**). Desde este punto de vista, cada nutriente mineral reingresa a un estado de biodisponibilidad desde la materia orgánica presente en el medio edáfico, mediante diversos procesos, cuya intensidad es dependiente de diversos parámetros medioambientales.

NUTRIENTES MINERALES			
Nutriente	**Origen del nutriente (% sobre el total)**		
	Atmósfera	**Procesos erosivos**	**Materia orgánica**
N	7	0	93
P	1	<10	>89
K	2	10	88
Ca	4	31	65

Tabla nº 4: Principales fuentes de nutrientes minerales disponibles en el medio edáfico en regiones de clima templado. Fuente: Chapin (1991)

1.2.1.3 Movimiento de los nutrientes minerales hacia la superficie radicular

A medida que el sistema radicular se desarrolla en el medio edáfico, intercepta una serie de nutrientes minerales. Sin embargo, la cantidad de nutrientes

adquirida a través de este proceso, es, a menudo, menor a la cantidad de nutrientes requeridos por el conjunto de tejidos que conforman la planta, de tal manera que los nutrientes minerales deben de moverse hacia el sistema radicular, vía difusión o vía flujo de masas, para satisfacer los requerimientos nutricionales de la planta.

El proceso de transpiración en las plantas, puede resultar en un transporte sustancial de nutrientes desde la solución del suelo hacia la superficie radicular vía flujo de masas. La magnitud que el flujo de masas presenta sobre la responsabilidad de transporte de nutrientes hacia el sistema radicular, es dependiente de la concentración de los distintos nutrientes en la solución del suelo en relación a los requerimientos por parte del desarrollo vegetal (Prenzel, 1979).

Si la concentración de nutrientes presentes en el entorno de la superficie radicular es inferior a la requerida para el desarrollo de la planta, esta sufre un desplome a consecuencia del proceso de absorción radicular (**Figura nº 3**). Esta situación, genera un gradiente de concentración que conduce un proceso de difusión iónico hacia el entorno del sistema radicular (como por ejemplo P_i y K^+). Otros iones, son puestos a disposición del sistema radicular a través del flujo másico de una forma más rápida de la que el sistema radicular puede asimilar (como por ejemplo Ca^{2+}), lo cual causa procesos de precipitación en la superficie radicular (a menudo como $CaSO_4$) (Barber y Ozanne, 1970). El proceso de difusión desde la solución del suelo hacia la superficie radicular, depende tanto del gradiente de concentración existente, como del coeficiente de difusión que presenta el ión (así por ejemplo, el anión NO_3^- presenta un coeficiente de difusión grande, moviéndose por tanto rápidamente hacia la superficie radicular; sin embargo, tanto el ión Zn^{2+} como el P_i, presentan coeficientes de difusión muy bajos, a causa de las interacciones específicas con los minerales de arcilla del complejo de cambio. Así pues, el contenido en minerales de arcilla, es uno de los factores que afectan al coeficiente de difusión. El N y el P, que son los macronutrientes que limitan de forma habitual el desarrollo de las especies vegetales, rara vez son suministrados en suficientes cantidades para satisfacer el desarrollo vegetal, a través del flujo másico; por lo tanto, es el mecanismo de difusión, el factor limitante en el suministro de estos nutrientes a las plantas, particularmente, en los ecosistemas naturales. Cuando la concentración iónica de la solución del suelo aumenta, como es en el caso de los suelos de aprovechamiento agrícola, el flujo másico proporciona una mayor fracción del N requerido para el desarrollo de la planta (Yanai et al., 1998).

Tanto el mecanismo de flujo másico como el de difusión, no pueden siempre responsabilizarse de un suministro adecuado de nutrientes minerales hacia la superficie radicular, con el objeto de que los requerimientos nutricionales se vean completamente satisfechos.

Así por ejemplo, el flujo másico para el caso del P_i se antoja como insuficiente, y el coeficiente de difusión para el caso de este mismo P_i es muy bajo como para permitir que que una cantidad suficiente de P_i pueda desplazarse a través del mecanismo de difusión. En situaciones como la expuestas, las micorrizas desempeñan un papel muy importante como mecanismo adicional de transporte de nutrientes hasta el sistema radicular.

Una escasa disponibilidad de recursos hídricos reduce las tasas de difusión en la mayor parte de los suelos; esto sucede a causa de una sustitución del agua de los poros del suelo, por aire, lo cual conlleva una mayor tortuosidad en el camino a seguir desde la solución del suelo hasta la superficie radicular. Como el mecanismo de difusión es factor limitante en la mayoría de los nutrientes claves (en términos de limitación más frecuente del desarrollo vegetal), la reducción en la disponibilidad de recursos hídricos, puede afectar sobremanera el desarrollo vegetal, ya que se puede considerar como mecanismo causal en la restricción de los requerimientos nutricionales de las plantas (Chapin, 1991).

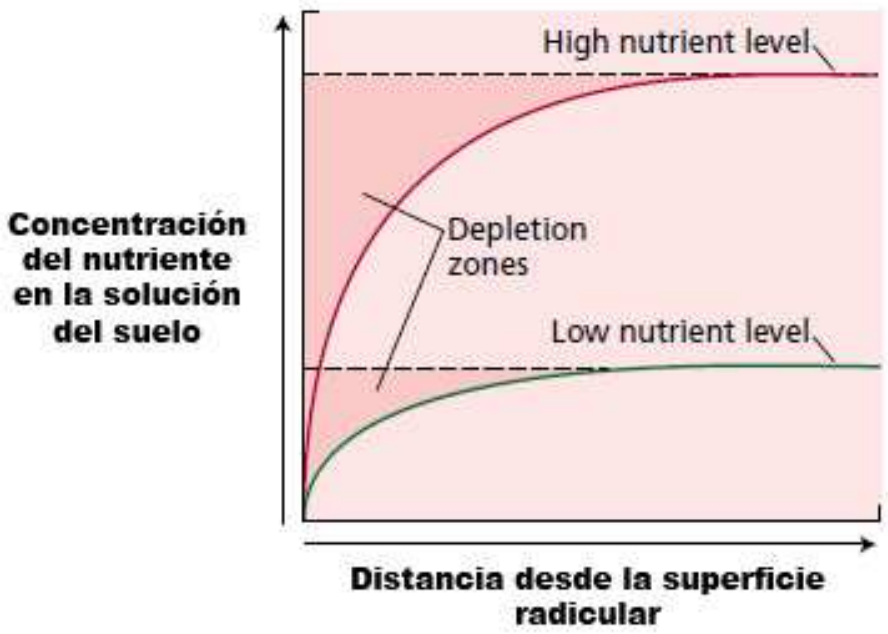


Figura nº 3: Formación de una zona de desplome en la concentración de nutrientes en la región del suelo adyacente a la superficie del sistema radicular vegetal. Estas zonas de desplome se originan a consecuencia de una mayor tasa de absorción del nutriente respecto de la capacidad de reposición del mismo por parte del proceso de difusión en la solución del suelo. Adaptado de Mengel y Kirkby (1987)

1.2.2 Atributos determinantes del sistema radicular en la absorción de los nutrientes minerales

La intensidad en la absorción de nutrientes es dependiente del area superficial radicular y de las propiedades en materia de absorción que presenta la citada superficie. Una vez que los nutrientes minerales arriban a la superficie radicular, deben de atravesar la membrana plasmática de las celulas radiculares que conforman dicha superficie radicular. De igual forma que en el caso de la asimilación de CO_2 en el proceso fotosintético, la intensidad en la absorción de los nutrientes minerales es función tanto de la concentración de los mismos en el medio de cultivo, como de la demanda que presenten las especies vegetales así como de la capacidad inherente de cada especie vegetal frente a la absorción de ciertos nutrientes. La demanda de nutrientes minerales en las especies vegtales, viene determinada por su estado de desarrollo y por la concentración de nutrientes existentes en los tejidos vegetales.

Puesto que el mecanismo de difusión, es el principal proceso de envio de nutrientes minerales limitantes desde el medio edáfico hacia el sistema radicular de las especies vegetales, el principal medio por el cual las plantas pueden incrementar su capacidad de adquisición de nutrientes, es a través del incremento de su superficie radicular. Su tamaño relativo, expresado por la relación masa radicular:masa total de la planta, se incrementa mediante el desarrollo de la planta en medios cuyo contenido en nutrientes sea muy limitado (proceso de aclimatación) (Brouwer, 1962).

La superficie radicular efectiva en el proceso de absorción de nutrientes, puede ser incrementada por los pelos radiculares absorbentes, cuya longitud varía desde 0,2 a 2 mm en función de la especie vegetal. Bates y Lynch (1996), constataron incrementos en la longitud de los pelos absorbentes radiculares de 0,1 a 0,8 mm, a consecuencia de una disminución en el suministro de NO_3^- o P_i.

El transporte de nutrientes a través de la membrana plasmática puede llevarse a cabo bien por difusión a favor de un gradiente de potencial electroquímico, o bien mediante un proceso de transporte activo en contra de este gradiente de potencial electroquímico. Este gradiente de potencial electroquímico es generado a través del bombeo de protones por medio de la bomba-protónica ATPasa, que bombea protones H^+ desde el citosol a través de la membrana plasmática.

Para la mayor parte de los iones nutritivos, el proceso de difusión a través de la bicapa lipídica de la membrana plasmática, es un proceso muy lento, a no ser que sea facilitado por proteínas de transporte. Tales proteínas de transporte incluyen canales de ión-específico (poros por medio de los cuales los iones pasan uno a uno a través de la membrana plasmática) (Roberts, 2006). Tanto los canales como las proteínas de transporte son, en principio, específicas para los iones, pero otros iones con estructura similar, pueden entrar ocasionalmente al interior de la celula a través de estas proteínas de transporte. Las proteínas de transporte están involucradas en el influjo de nutrientes desde la rizosfera, así como en el transporte de parte de los nutrientes adquiridos en las vacuolas y la descarga en el xilema (De Boer y Wegner, 1997).

1.3 LOS NUTRIENTES MINERALES DE LAS PLANTAS

1.3.1 Nitrógeno

1.3.1.1 Nitrógeno en el sistema suelo-planta

Aunque su estudio no se aborda en esta tesis doctoral, la inclusión de este nutriente mineral en la revisión bibliográfica introductoria llevada a cabo, se antoja necesaria a consecuencia de su importancia como macronutriente.

El ciclo del N en el sistema suelo-planta es muy dinámico y complejo a causa de la involucración en el mismo de factores edáficos, climáticos y vegetales. El conocimiento del ciclo de este nutriente en el sistema suelo-planta, es un aspecto fundamental en la comprensión de las condiciones de biodisponibilidad del N para las especies vegetales y para la adopción de prácticas de manejo apropiadas, con el objeto de una maximización de la absorción y la eficiencia en el uso de este

nutriente por parte de las especies vegetales (Fageria y Baligar, 2005a). De forma simplificada, las principales fuentes de entrada de N en el sistema suelo-planta, son las siguientes: fertilizantes químicos, enmiendas orgánicas y los procesos de fijación biológica de N_2. De un modo similar, las principales vías de salida de N de este sistema suelo-planta, están costituidas por los procesos de lixiviación, el proceso de denitrificación y la absorción por parte de las especies vegetales. El proceso de inmovilización del N tiene una infuencia de carácter temporal sobre los procesos de absorción de N por las especies vegetales. La inmovilización del N, es definida como la integración de los componentes nitrogenados inorgánicos ($NH_4^+, NO_3^-, NO_2^-, NH_3$) en estructuras de naturaleza orgánica. Los organismos del suelo, asimilan los compuestos inorgánicos nitrogenados y los transforman en componentes nitrogenados orgánicos, integrándose como constituyentes de células y tejidos de la biomasa del suelo (Jansson y Persson, 1982). Más del 90% del N existente en los suelos, se encuentra en forma de materia orgánica, encontrándose por tanto este N, protegido de las pérdidas por lixiviación; no obstante, en este estado, tampoco se encuentra disponible para las especies vegetales. Las formas orgánicas de N, deben de ser mineralizadas a las formas NH_4^+, y NO_3^- para que puedan ser absorbidas por las especies vegetales. Las formas de N mineral, rara vez constituyen más del 1 ó 2% del N total existente en el suelo (Brady y Weil, 2002). El proceso de mineralización, es la conversión de un elemento desde una forma orgánica a un estado inorgánico como resultado de la actividad microbiana (Soil Science Society of America, 1997). De acuerdo con Stevenson (1982), la mineralización, es la conversión de las formas orgánicas de N, a las formas de NH_4^+ y NO_3^-. La conversión inicial a NH_4^+, es denominada amonificación, mientras que la oxidación de este compuesto a NO_3^-, recibe la denominación de nitrificación. El proceso de nitrificación, que tiene lugar en dos fases en el sistema suelo-planta, puede ser representado por las siguientes ecuaciones:

$$2NH_4^+ + 3O_2 \leftrightarrow 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+$$
$$2NO_2^- + O_2 \leftrightarrow 2NO_3^-$$

En el proceso denominado nitrificación, las bacterias Nitrosomonas spp. están involucradas en el proceso de conversión de amonio a nitritos, mientras que las bacterias *Nitrobacter spp.* son las encargadas de transformar los nitritos en nitratos. Ante la existencia de uas condiciones de temperatura y humedad edáfica óptimas, el proceso de nitrificación tiene lugar a gran velocidad. Como añadidura a lo anterior, la nitrificación es un proceso oxidativo, de tal manera que la aireación del suelo, incrementa los procesos de nitrificación en el mismo. Los procesos de laboreo y la puesta en cultivo del suelo, son procesos reconocidos como medios de intensificación de la nitrificación. El proceso de nitrificación, trae consigo la liberación de iones H_3O^+, lo cual conlleva a la acidificación del suelo. De forma adicional, los procesos enzimáticos de la nitrificación, también liberan energía. La utilización de los iones NH_4^+, y NO_3^- por parte de las especies vegetales y los microorganismos, constituyen procesos de asimilación e inmovilización respectivamente. Los iones nitrato (NO_3^-), son iones cargados negativamente, siendo presa fácil para los procesos de lixiviación a causa de las precipitaciones o el empleo del riego. La cantidad de N sometido a procesos de lixiviación, es dependiente del tipo de suelo frente al cual nos encontremos, la fuente de fertilizante nitrogenado empleada, el cultivo y la metodología empleada en la aplicación del fertilizante. El nitrato, por otra parte, se constituye como el principal factor asociado con el lavado de bases (Ca,

Mg y K) del medio edáfico. A medida que estas bases son desplazadas y sustituidas por iones H_3O^+, los suelos comienzan a acidificarse.

El proceso de denitrificación, es la principal fuente de pérdidas de N del sistema suelo-planta, siendo un proceso bacteriano en condiciones aneróbicas. La denitrificación sucede a través de los siguientes procesos reductivos:

$$NO_3^-(\text{nitrato}) \rightarrow NO_2^-(\text{nitrito}) \rightarrow NO(\text{óxido nítrico}) \rightarrow N_2O(\text{óxido nitroso}) \rightarrow N_2$$

La mayoría de las bacterias denitrificantes, se encuentran en la parte superior del suelo (0-30 cm), disminuyendo su presencia de forma exponencial hasta los 130-150 cm (Parkin y Meisinger, 1989). El proceso de denitrificación, se ve influenciado por diversos factores como el pH del suelo, la temperatura, el suministro de $C_{\text{orgánico}}$, la concentración de nitratos, la aireación y el estado hídrico (Aulakh et al., 1992). A causa de la influencia de todas estos factores físicos y químicos, la cuantificación exacta de las pérdidas de N por denitrificación es una tarea dificultosa. No obstante, Aulakh et al. (1992), informaron que, de una forma global, las pérdidas de N a causa de la denitrificación en un agroecosistema, pueden estar en torno a un 30%. Una gran parte del N, retorna de nuevo en última instancia a la atmósfera, a través del proceso de denitrificación (Stevenson, 1982). El proceso de denitrificación, acontece, habitualmente, en aquellos suelos con un elevado contenido en materia orgánica que permanecen anegados durante largos períodos de tiempo y cuyas temperaturas se muestran elevadas.

La volatilización del amonio es otro proceso importante de pérdidas de N del sistema suelo-planta cuando los fertilizantes nitrogenados son aplicados en superficie, especialmentye en aquellos suelo de pH básico. La volatilización del amonio, puede expresarse a través de la siguiente ecuación (Bolan y Hedley, 2003):

$$NH_4^+ + OH^- \leftrightarrow NH_3 + H_2O$$

Las pérdidas por volatilización procedentes de la aplicación en superficie de fuentes de N que contengan urea, puede ser relacionada con la naturaleza del suelo y las condiciones climáticas que sigan al momento de la aplicación del fertilizante.

La absorción y pérdidas de N a través del follaje de la planta constituyen también parte importante de las entradas y salidas de N en el sistema suelo-planta. Estudios realizados, tanto en condiciones controladas como en condiciones de campo, han mostrado que las plantas pueden absorber NH_3 procedente del aire circundante, así como perder NH_3 a la atmósfera que las rodea por procesos de volatilización (Farquhar et al., 1980; Fageria y Baligar, 2005a). Las emisiones de NH_3 se ven influenciadas por el estaus de N existente en el suelo y en la planta, así como por el estado de desarrollo vegetal (Sharpe y Harper, 1997). Así, un abundante suministro de N, favorece las pérdidas por NH_3, especialmente si este suministro se encuentra muy por encima de las necesidades de la planta (Fageria y Baligar, 2005a). Determinados investigadores, han publicado que las mayores pérdidas de NH_3 por volatilización en las principales especies vegetales objeto de cultivo, tienen lugar durante el período reproductivo del vegetal (Francis et al., 1997).

La absorción de NH_3 atmosférico por parte de la planta, ha sido asociada con plantas con escaso contenido en N y con elevadas concentraciones atmosféricas de NH_3 (Harper y Sharpe, 1995).

La fijación de NH_4^+ es parte importante en el ciclo del N, en el sistema suelo-planta. Tres procesos específicos son reconocidos como responsables de la citada fijación; estos son, fijación por los minerales de arcilla, fijación por la materia orgánica del suelo e inmovilización biológica por microorganismos heterótrofos (Nommik y Vahtras, 1982).

Una gran cantidad de N, sale del sistema suelo-planta a través de la recolección de la cosecha, lo cual significa, que en la construcción de una estrategia de manejo del N en el sistema agrobiológico, la extracción de N por la cosecha, debe de ser tenida en cuenta.

1.3.1.2 Funciones en la planta

El N presenta una gran influencia tanto en el crecimiento como en el rendimientos de las plantas objeto de cultivo (su influencia es mayor que cualquier otro nutriente mineral esencial). Juega un papel clave en diversos procesos bioquímicos y fisiológicos vegetales. El N se constituye como elemento estructural de divesos componentes orgánicos cuya importancia es vital (proteínas y ácidos nucleicos). Es parte constituyente de la molécula de clorofila. Mucha enzimas presentan naturaleza proteica, de tal forma que el N presenta un papel clave en diversas reacciones metabólicas. El N, también es un constituyente esencial de las paredes celulares. Las plantas deficientes en N, se desarrollan de forma lenta y su superficie foliar es deficiente. Las deficiencias por N disminuyen el índice de superficie foliar, provoca una disminución en la eficiencia en el uso de la radiación solar y disminuye la actividad fotosintética de las especies vegetales (Muchow, 1988; Sinclair y Horie, 1989; Fageria y Baligar, 2005a).

Se ha hallado correlación positiva significativa entre la tasa de saturación lumínica fotosintética en la hoja y su contenido en nitrógeno (Evans, 1989; Poorter y Evans, 1998).

Las plantas deficientes en N, presentan un menor número de pelos radiculares absorbentes en comparación con aquellas cuya nutrición nitrogenada es adecuada (Fageria, 1992).

1.3.1.3 Interacciones nutricionales

En términos de nutrición mineral, las interacciones serán designadas como sinérgicas (positivas), antagónicas (negativas) o neutrales. La interacción entre nutrientes, puede tener lugar a nivel de la superficie radicular o en el interior de la propia planta.

La relación entre la el $C_{orgánico}$ y el $N_{orgánico}$ del suelo, conocida como el índice C:N, ejerce control sobre la disponibilidad del N. Un índice C:N>30, generalmente supone una inmovilización de N en el sistema suelo-planta, dando lugar a posibles deficiencias por N en las plantas objeto de cultivo (Fixen, 1996). El N presenta

interacciones positivas con el P y el K. Wilkinson et al. (2000), notificó que la aplicación de N había provocado incrementos en la asimilación de P, K, S, Ca y Mg, toda vez que la provisión de estos elementos nutritivos en el medio de cultivo, había sido dispuesta en cantidades suficientes por parte de los investigadores.

El incremento en la absorción de macronutrientes por parte de las especies vegetales como respuesta a la adición de N, tiene su justificación en el incremento en el número de pelos absorbentes radiculares, cambios químicos en la rizosfera, así como cambios fisiológicos estimulados por el N cuya influencia se extiende hasta el transporte de estos elementos en el interior de la planta (Marschner, 1995; Baligar et al., 2001). La absorción rápida de los iones nitrato por parte de la planta, es dependiente de un contenido adecuado de K en el medio edáfico. Las plantas objeto de cultivo, requeriran de mayores cantidades de K, a medida que se incrementen las tasa de absorción de N por parte de la planta, para poder sacar beneficio de los aportes extras de N (Fageria y Gheyi, 1999). Las interacciones del N con los micronutrientes, son dependientes de los cambios que tengan lugar en el pH de la rizosfera; si el N es absorbido en forma de NH_4^+, el pH de la rizosfera puede disminuir, de tal forma que la absorción de la mayor parte de los micronutrientes se verá favorecida. Si el N es absorbido principalmente en forma de NO_3^-, el pH de la rizosfera puede verse incrementado, y la absorción de la mayor parte de los micronutrientes, se verá entonces limitada. Otras interacciones que tienen lugar entre los micronutrientes y el N, pueden estar asociadas con la respuesta de las plantas de cultivo objeto de una fertilización nitrogenada, de tal forma que los incrementos en el desarrollo a causa de la aplicación de fertilizantes nitrogenados, pueden incrementar las demandas de micronutrientes por parte de las plantas, pudiendo acaecer en ese momento las circunstancias de deficiencia por micronutrientes (Wilkinson et al., 2000).

El cloro, disminuye la absorción de NO_3^- e incrmenta la de NH_4^+ (Huber y Thompson, 2007). Estos mismos autores, han indicado que el NH_4^+, presenta un efecto sinérgico sobre el manganeso (Mn).

1.3.2 Fósforo

1.3.2.1 Fósforo en el sistema suelo-planta

El origen del P existente en el medio edáfico, incluye la fracción mineral proveniente de los procesos erosivos y los aportes externos en forma de fertilizante mineral o enmienda orgánica. Sólo una pequeña parte del P existente en el suelo, se encuentra en forma disponible para las especies vegetales. Las formas minerales en las cuales se halla el P en el suelo, son principalmente formas ligadas al Ca, Fe y Al. Las formas de P ligadas al Ca, predominan en los suelos de pH básico, mientras que las formas de P vinculadas al Fe y Al, predominan en los suelos de carácter ácido. La fracción orgánica del P presenta una gran variabilidad en los suelos, pudiendo constituir desde un 20 hasta un 80% del P total presente en los horizontes superficiales (Brady y Weil, 2002). La fracción orgánica del P, debe de ser mineralizada mediante la acción microbiana antes de poder ser absorbido por las plantas.

Las principales peculiaridades del ciclo del P involucran a su adición en el sistema suelo-planta, su transformación, las pérdidas y su absorción por parte de las especies vegetales. Los procesos de solubilización e inmovilización, son los principales procesos de transformación del P en el sistema suelo-planta, constituyendo las principales acciones de control en cuanto a disponibilidad del P para las plantas y a pérdidas potenciales desde el sistema suelo-planta. La inmovilización o fijación, es definida como la adsorción o precipitación de los iones de P, sobre los hidróxidos de Fe y Al. En la mayor parte de los suelos, la solución del suelo presenta rangos de concentarción para el P que van desde <0.01 hasta 1 mg l^{-1}, considerándose un valor de 0.2 mg l^{-1} como comúnmente aceptado, en cuanto a requerimiento de las mayor parte de las plantas cultivadas para satisfacer sius necesidades nutritivas (Wood, 1998). Los procesos erosivos y de lavado, así como la absorción por parte de las plantas, son consideradas como las principales vías de salida del P en el sistema suelo-planta.

La absorción de P por parte de las especies vegetales, tiene lugar de forma principal en forma de ión $H_2PO_4^-$ en los suelos ácidos, mientras que en aquellos suelos de naturaleza básica, la absorción tiene lugar principalmente en forma de ión HPO_4^{2-}. Las diferentes proporciones de estos dos iones en el suelo, está governada por el pH. Foth y Ellis (1988), sugirieron, como conclusión de diversos estudios, que las plantas prefieren de forma preferente la forma iónica $H_2PO_4^-$ sobre la forma iónica HPO_4^{2-}. Puesto que la conversión entre ambas formas en la solución del suelo, es relativamente rápida, esta preferencia mostrada resulte ser probablemente de poca importancia para aquellos suelos cuyo rango de pH se encuentre entre 4 y 8 (Foth y Ellis, 1988).

La absorción de P por las plantas está gobernada por la aptitud que presente el medio edáfico en el suministro de P al sistema radicular vegetal y por las características de desorción del suelo (Fageria et al., 2003). En los suelos ácidos, el fósforo es principalmente inmovilizado o fijado por iones de Fe y Al a través de las siguientes reacciones:

$$Al^{3+} + H_2PO_4^-(\text{soluble}) + 2H_2O \leftrightarrow Al(OH)_2H_2PO_4(\text{insoluble}) + 2H^+$$
$$Fe^{3+} + H_2PO_4^-(\text{soluble}) + 2H_2O \leftrightarrow Fe(OH)_2H_2PO_4(\text{insoluble}) + 2H^+$$

En los suelos de naturaleza básica, la inmovilización o fijación del P tiene lugar a través de la siguiente reacción:

$$Ca(H_2PO_4)_2(\text{soluble}) + 2Ca^{2+} \leftrightarrow Ca_3(PO_4)_2(\text{insoluble}) + 4H^+$$

A consecuencia de estos anteriores procesos, tanto en suelos de pH moderadamente ácido, como en aquellos de pH moderadamente básico, las concentraciones de P en la solución del suelo, son a menudo escasas para satisfacer las necesidades nutritivas de las plantas (Jayachandran et al., 1989).

Las reacciones del P en el suelo involucran tanto a procesos de adsorción como de precipitación, los cuales, se piensa que son resultado de fuerzas químicas de la misma naturaleza (Lin et al., 1983; Bolan et al., 1999). Lin et al. (1983), sugiere que los mecanismos de adsorción prevalecen a bajas concentraciones de P, mientras que los de precipitación, prevalecen a elevadas concentraciones de P.

Toda la discusión planteada hasta el momento ante la problemática de los procesos de fijación del P, ha sido referida a aquellos casos en los cuales los suelos se encuentran bien aireados; ¿qué sucede con el P en aquellos suelos que permanecen anegados. La disminución en el potencial redox de los suelos inundados, produce transformaciones en diversas especies químicas. Al revertir estas condiciones de encharcamiento mediante operaciones de drenaje, se alcanza un incremento en la reactividad química de los minerales del suelo que contienen P (Sah y Mikkelsen, 1986). Factores como la adición de materia orgánica y la existencia de temperaturas favorables que aceleran los procesos de anaerobiosis, pueden incrementar los procesos de sorción del P. Bajo el arbitrio de condiciones aeróbicas en el medio edáfico, la adición de materia orgánica disminuye los procesos de sorción e incrementa los procesos de desorción del P (Kuo, 1983; Singh y Jones, 1976).

La actividad de las enzimas fosfatasas que liberan el P_i procedente de las fuentes orgánicas de P, implica que el P en forma orgánica es hidrolizado independientemente de la utilización que llevan a cabo los microorganismos de la materia orgánica del suelo. Como añadidura a lo anterior, los exudados radiculares pueden incrementar los procesos erosivos a los que se ven sometidos los minerales presentes en el suelo y movilizar el P sometido a procesos de sorción a las partículas del suelo (el término sorción, hace referencia tanto a los procesos de adsorción (precipitación) sobre partículas del suelo, como a los procesos de absorción en el interior de estas partículas)) (Barrow, 1984).

Cuando el ciclo del P se somete a comparativa con el ciclo del N, el primero es considerablemente menos dependiente de la descomposición microbiana de la materia orgánica, tanto a escala biológica, como geológica (Gressel y McColl, 1997; Johnson et al., 2003).

1.3.2.2 Funciones en la planta

El P juega un papel fundamental en el almacenamiento y transferencia de energía en las plantas. Tanto adenosín-trifosfato $(ATP \rightarrow ADP + P_i)$, como adenosín-difosfato (ADP), son moleculas con enlaces anhídridos de grupos fosfato ricos en energía, que impulsan la mayoría de los procesos fisiológicos en las plantas, incluyendo fotosíntesis, respiración, síntesis de ácidos nucleicos y transporte iónico a través de las membranas celulares (Eastin y Sullivan, 1984; Wood, 1998).

El P constituye un elemento de calidad en las cosechas. La formación de semillas y frutos, se ve especialmente deprimida en aquellas plantas condicionadas por una deficiencia en P. De esta forma, no sólo se produce una merma en las cosechas, sino que también es obtenida una peor calidad en las semillas y en los frutos procedentes de palntas sometidas a condiciones de escasez de P (Mengel et al., 2001). El P es requerido en cantidades especialmente grandes en los tejidos meristemáticos, donde las células crecen y se multiplican con gran rapidez (Brady y Weil, 2002). El P, es también un componente esencial de la fitina, un componente de las semillas esencial para que la germinación se vea inducida. La carencia de P, puede inducir una reducción en el tamaño y número de las semillas, así como en su viabilidad.

La superficie foliar, el número de hojas y el proceso de expansión del limbo, se ven deprimidos ante situaciones de stress por carencia de P (Lynch et al., 1991; Qui e Israel, 1992; Halsted y Lynch, 1996). Las condiciones deficientes en P, han sido descritas como causantes de la disminución de la fijación y asimilación del C (Fredeen et al., 1990; Usuda y Shimogawara, 1991; Halsted y Lynch, 1996). Los mecanismos sugeridos como causantes de la disminución en la fijación y asimilación del C, incluyen la limitación en las funciones de translocación de las triosas fosfato (Heber y Heldt, 1981), limitaciones en la reutilización de los grupos fosfato (Stitt, 1986) y una disminución en la regeneración de ribulosa 1,5-bisfosfato (RuBP) (Abadía et al., 1987).

El P es un nutriente móvil en el interior de la planta, por lo tanto, los síntomas de carencia en este nutriente aparecen en primer lugar en las hojas adultas. Cuando el P se encuentra en estado carencial, las multiplicaciones celulares y el proceso de expansión de las hojas se ve retrasado con respecto a la formación de la clorofila, de tal manera que el contenido de clorofila por unidad de área foliar se incrementa, pero la eficiencia fotosintética por unidad de clorofila disminuye (Marschner, 1995). El P no es un constituyente de la clorofila, así pues, la concentración de clorofila en las plantas con estados carenciales en P, llega a ser comparativamente alta con respecto a aquellas plantas cuyo estado nutricional en P es adecuado, adquiriendo los limbos de las plantas afectadas tonos verdeoscuro.

1.3.2.3 Interacciones nutricionales

De forma general, el P tiene una interacción positiva significativa con el N, el K y el Mg. Esta interacción positiva del P con los macronutrientes, puede estar asociada con un incremento en el desarrollo y producción de los cultivos sometidos a fertilización fosfatada, de tal forma que los requerimientos de nutrientes se ven incrementados (Wilkinson et al., 2000). Entre los micronutrientes, la interacción más significativa en términos de publicaciones científicas, es la existente entre el P y el Zn (Sumner y Farina, 1986; Wilkinson et al., 2000). Esta interacción P-Zn, es de naturaleza antagónica y se vincula a que el Zn biodisponible en el medio edáfico, no puede colmar las demandas generadas por las plantas cuyo desarrollo se ve potenciado (Fageria, 1989).

1.3.3 Potasio

1.3.3.1 Potasio en el sistema suelo-planta

La principal fuente de potasio (K) para el desarrollo de las plantas son los fertilizantes químicos, las enmiendas orgánicas y los minerales en los cuales entra en su composición. Las principales vías de salida del medio edáfico, son las extracciones por cosecha, las pérdidas por lixiviación, los fenómenos de erosión y la inmovilización por los microorganismos y los coloides del suelo. La mayor parte de las pérdidas de K en el sistema suelo-planta acontecen a causa de los fenómenos de erosión y a las extracciones por cosecha.

La mayor parte de los iones K^+ se desplazan hacia el sistema radicular de las plantas mediante el proceso de difusión. Este proceso de difusión es dependiente de diversos factores entre los cuales se incluyen el contenido hídrico en el suelo, la

tortuosidad del trayecto que deba de llevarse a cabo durante el propio proceso, la temperatura, el coeficiente de difusión del K^+ en el agua y el gradiente de concentración del K^+ (principalmente en la región adyacente a los pelos absorbentes del sistema radicuar) (Bertsch y Thomas, 1985). La concentración de potasio en la mayoría de las soluciones del suelo es muy baja (0.1–0.2%) en relación al K^+ de cambio (1–2%), a causa de la fuerte adsorción que efectúan diversos silicatos minerales con estructura laminar 2:1; el K^+ en estado no intercambiable se encuentra en el rango 1-10%, y en torno a un 90-98% del K^+, se encuentra en forma de mineral-K^+. De esta manera, el K^+ en estado no intercambiable y el que se encuentra en forma de mineral-K^+, son las principales formas de K^+ existentes en el sistema suelo-planta, pudiendo los iones K^+ desplazarse de una categoría a otra, a medida que la adición o salida de iones K^+ desequilibren el equilibrio existente en el pool de K^+ del suelo (Fageria et al., 2003). La aptitud de un suelo para reabastecer la solución de iones K^+, es dependiente de las transformaciones existentes entre las diferentes formas de K^+ lábil y de la naturaleza de sus respectivos equilibrios con la solución del suelo (Bertsch y Thomas, 1985).

La mayor parte del K^+ existente en el suelo, forma parte de estructuras cristalinas laminares de minerales silicatos (**Figura nº 4**), principalmente feldespatos y micas. Los minerales silicatos liberan K^+ lentamente a través de los procesos erosivos. Los minerales secundarios de arcilla, especialmente los de naturaleza laminar 1:1 (caolinita), son fuentes importantes de K^+, liberando K^+ de una forma más sencilla que los de naturaleza laminar 2:1 (vermiculita, montmorillonita, micas, micas hidratadas y beidellita) (De Datta y Mikkelsen, 1985).

En condiciones de campo, y si las condiciones de drenaje son adecuadas, las pérdidas por lavado de K^+pueden resultar considerables (Chang, 1971). La fijación del K^+ por los minerales de arcilla, disminuye la susceptibilidad del K^+ a los procesos de lavado y al consumo de lujo por parte de las especies vegetales. El lavado del K^+ se encuentra determinado por los niveles de precipitación y por la naturaleza propia del suelo. Así, los suelos de textura ligera, son más propensos a los procesos de lavado del K^+ en comparación con los suelos de textura pesada. Esto puede ser debido a la escasa capacidad de intercambio catiónico de los suelos de textura ligera. Havlin et al. (1985), han mostrado que en los suelos con textura pesada, el suministro de K^+ en forma biodisponible, se realiza a más largo plazo que en el caso de los suelos de textura ligera. Entre las propiedades químicas del suelo que influencian la biodisponibilidad del K^+, se incluyen la actividad del ión K^+ en la solución del suelo y su tasa de difusión, la capacidad tampón del medio edáfico y el equilibrio existente entre el complejo de cambio y la solución del suelo.

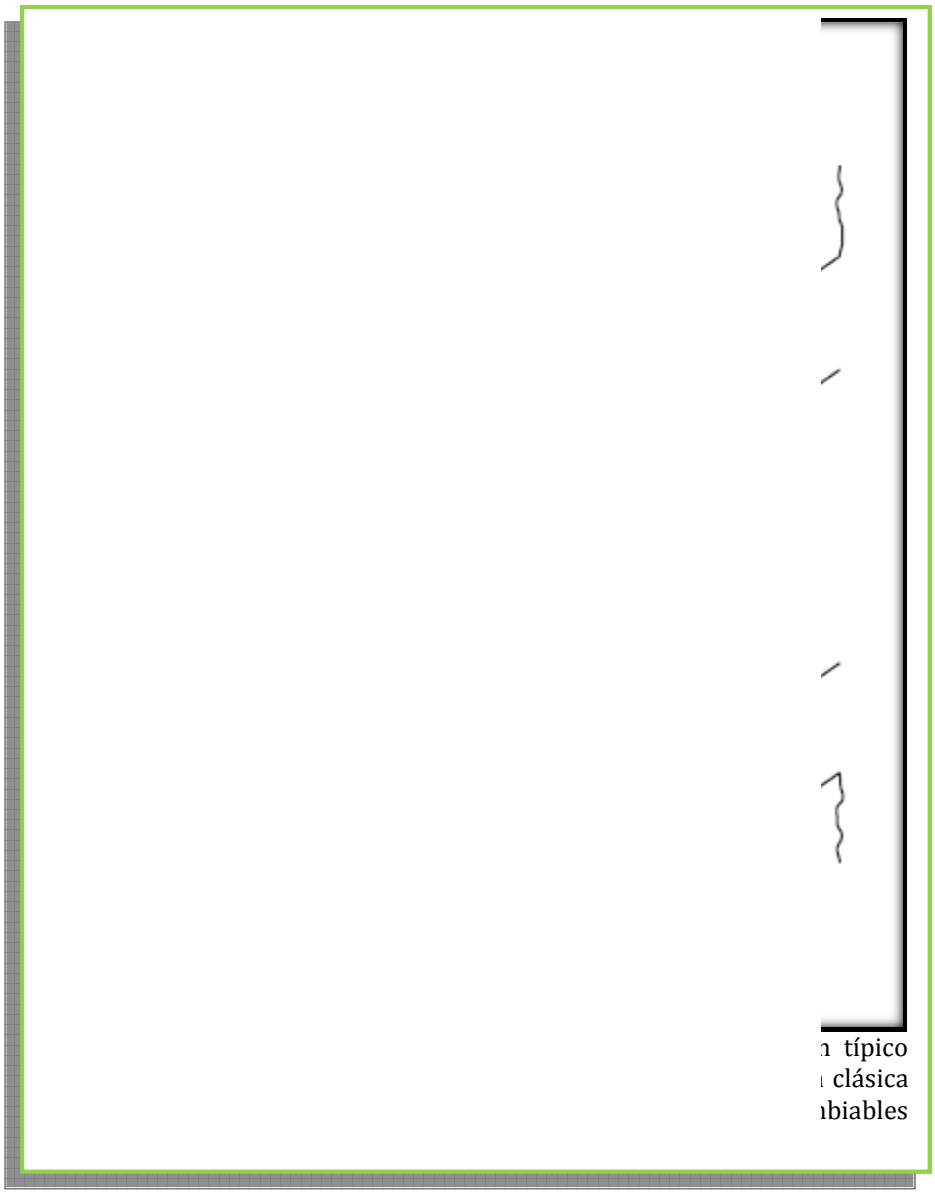
1.3.3.2 Funciones en la planta

Se pueden resumir en las siguientes (Fageria y Gheyi, 1999):

1. Estimula el desarrollo radicular beneficiando la absorción de agua y nutrientes.
2. Es requerido para la activación de más de 60 sistemas enzimáticos involucrados en el desarrollo vegetal.
3. Reduce la tasa de respiración, actuando de forma preventiva frenet a las pérdidas de energía.

4. Presta asistencia en el proceso fotosintético.
5. Toma parte en la translocación de azúcares y almidón.
6. Incrementa el contenido proteico en las especies vegetales.
7. Mantiene el turgor celular, reduciendo las pérdidas hídricas (acción preventiva frente al marchitamiento).
8. Aunque no es un constituyente de la clorofila, un síntoma característico de su carencia es la destrucción de la molécula de clorofila.
9. Neutraliza los ácidos producidos durante el metabolismo de los carbohidratos en las células vegetales.
10. Está intimamente ligado a la apertura y cierre de los estomas.
11. Estimula la absorción y transporte de Fe, tanto en plantas monocotiledóneas como dicotiledóneas.

No sólo incrementa la resistencia de los tejidos vegetales frente a los hongos patógenos, sino que también reduce las poblaciones de hongos en el medio edáfico (Huber y Arny, 1985).



n típico
clásica
ıbiables

El K, de igual forma que el N y el P, presenta una gran movilidad en a través de los tejidos vegetales; en base a lo anterior, las deficiencias de K se manifestarán en primer lugar en la hojas adultas.

1.3.3.3 Interacciones nutricionales

Han sido notificadas interacciones positivas para el K con el N y el P (Dibb y Thomson, 1985). Dibb y Welch (1976), publicaron que el incremento en los niveles de K permitieron una rápida asimilación por la planta de los iones NH_4^+ absorbidos, colaborando en el mantenimiento de niveles no tóxicos de NH_3. El incremento de productividad en los cultivos a causa de la adición de N y P, provoca mayores requerimientos de K por parte de la planta (Dibb y Thompson, 1985; Fageria et al., 1997a, 1997b).

La interacción antagónica entre el ión K^+ y los iones Ca^{2+} y Mg^{2+}, ha sido ampliamente publicada (Johnson et al., 1968; Fageria, 1983; Dibb y Thompson, 1985). Fageria (1983), publicó, que la reducción en la absorción de Ca^{2+} a causa de los incrementos de K^+ en el medio de cultivo, estaba íntimamente asociada con los incrementos en la absorción de K^+. La competitividad entre el ión K^+ y los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} a consecuencia de propiedades de naturaleza fisiológica de estos iones, ha sido publicada por Johnson et al. (1968) y Fageria (1983).

Hill y Morrill (1975), así como Gupta (1979), han publicado que elevadas tasas de K, disminuyen la absorción de B, intensificándose esta deficiencia en las especies vegetales. Dibb y Thompson (1985), realizaron un estudio entre la interacción existente entre el K y el Cu, publicando que la absorción de Cu se vió incrementada con la adición de K. Matocha y Thomas (1969), publicaron que la aplicación conjunta de Fe y K, provocaba incrementos en los rendimientos del sorgo. Fageria (1984), publicó como la toxicidad por Fe^{2+} en arroz, se veía reducida con la existencia de niveles adecuados de K^+ en el medio edáfico. Dibb y Thompson (1985), publicaron como el K^+ beneficiaba la absorción de Mn^{2+}, cuando este último elemento se encontraba en concentraciones deficientes en el medio de cultivo, disminuyendo su absorción cuando estaba presente en concentraciones potencialmente tóxicas. El efecto beneficioso del K sobre la absorción de Zn, ha sido publicado por Dibb y Thompson (1985).

1.3.4 Calcio

1.3.4.1 Calcio en el sistema suelo-planta

El contenido de Ca^{2+}en el suelo, es dependiente de la naturaleza del material parental del mismo, el grado de meterorización de los minerales presentes en el suelo de forma natural y de las prácticas de fertilización y encalado efectuadas en el mismo.

El Ca es desplazado del sistema suelo-planta, de forma principal por lavado, por erosión y por las extracciones de la cosecha. Ante el gobierno de determinadas condiciones, se encuentra también adsorbido sobre los coloides del suelo. Ante condiciones de pH ácido en el medio edáfico, el ión Ca^{2+}, se ve desplazado del

complejo de cambio por los iones Al^{3+} y H_3O^+, de tal forma que la lixiviación del ión Ca^{2+} puede sobrevenir.

Un importante porcentaje de Ca en el suelo se encuentra en forma de Ca^{2+} intercambiable, el cual depende de la capacidad de intercambio catiónica del suelo. La concentración de Ca^{2+} en la solución del suelo está determinada por la capacidad de intercambio catiónico, la naturaleza de los enlaces con las posiciones de intercambio, el pH del suelo y los niveles de aniones en la solución.

El Ca de cambio (Ca^{2+}) está vinculado con mayor intensidad a los coloides del suelo, que cualquiera de los otros macroelementos K^+ y Mg^{2+}, constituyendo tanto este Ca, como el presente en la solución del suelo, las principales formas de Ca que pueden moverse hacia el sistema radicular y ser absorbido por la planta (Barber, 1995). Tanto el yeso como el carbonato de calcio, son los minerales del suelo que presentan una mayor solubilidad y un mayor contenido en Ca. El flujo de masas es, generalmente, el mecanismo principal a través del cual se produce el suministro de Ca al sistema radicular de las plantas para su absorción.

A medida que el pH del suelo se incrementa, la adsorción de Ca y Mg también se ve incrementada, especialmente en aquellos suelos ricos en óxidos de hierro y aluminio. El pH en estas situaciones, en términos de definir la adsorción del Ca y el Mg en suelos de carga variable, actúa de dos modos. Uno de ellos es el incremento de la carga negativa de los suelos, proporcionando un mayor número de sedes de intercambio con una mayor afinidad por los cationes divalentes; el otro modo, es el incremento de la concentración de cationes de Ca^{2+} hidrolizados

$$Ca^{2+} + OH^- \leftrightarrow CaOH^+$$

que pueden pasar a ser específicamente adsorbidos dentro de la estructura laminar coloidal (James y Healy, 1972). Puesto que estos dos efectos tienen lugar de forma simultánea a medida que el pH del suelo se ve incrementado, un rápido incremento de los cationes Ca^{2+} tiene lugar en la medida en que la situación descrita tiene lugar (Chan et al., 1979). Ante pH<6, la mayoría del Ca adsorbido permanece en estado intercambiable, pero a medida que el pH se incrementa, una mayor cantidad de cationes divalentes pasan a ser adsorbidos de forma específica y consecuentemente no permanecen en estado intercambiable (Chan et al., 1979).

1.3.4.2 Funciones en la planta

El Ca está involucrado en la división y elongación celular, jugando un papel fundamental en el mantenimiento de la integridad de la membrana celular (Fageria et al., 1997). El Ca se encuentra vinculado en la catalización de ciertos sitemas enzimáticos involucrados en la hidrólisis de adenosina trifosfato (ATP) y fosfolípidos, reemplazando parcialmente al Mg en determinadas reacciones.

El desarrollo del sistema radicular, se ve seriamente restringido en aquellas plantas deficientes en Ca, de tal forma que el sistema radicular se muestra más propenso a las infecciones por hongos y bacterias. El Ca presenta función protectora en la membrana plasmática frente a los efectos deletéreos de los iones H^+ en condiciones de pH bajo, reduciendo también los efectos nocivos de los iones Na^+ en

condiciones de salinidad del medio de cultivo (Epstein y Bloom, 2005). Diversos estrés de tipo biótico y abiótico, se ven atenuados ante la existencia de concentraciones de Ca adecuadas en el entorno de la rizosfera (Reddy y Reddy, 2002). El papel que desempeña el Ca en la apertura de los estomas, ha sido esclarecido por Schroeder et al. (2001) y por Epstein y Bloom (2005). El Ca actúa también como ión regulador en la translocación de carbohidratos a través de sus efectos sobre las células y sobre las paredes celulares (Bennett, 1993). El Ca se considera indispensable para la germinación del polen y el desarrollo del tubo polínico en numerosas especies vegetales (Fageria y Gheyi, 1999). Por otra parte, en las semillas de la mayor parte de las plantas cultivadas se acumula muy poco Ca^{2+}.

El Ca actúa como mediador en el transporte iónico a través del plasmalema (membrana plasmática en las células vegetales). Las siguientes posibilidades han sido propuestas por Fageria (1983):

1. Incremento de la formación de transportadores (carriers).
2. Función como cofactor en la formación del transportador.
3. Incremento de la afinidad entre el transportador y el ión.
4. En presencia de Ca, la estabilidad de la estructura del protoplasma se ve incrementada, y consecuentemente, el ión absorbido puede coligar en una forma más estable.
5. Incrementa la formación de mitocondrias, que participan con un papel importante en la acumulación iónica.
6. Influencia en la permeabilidad selectiva en la superficie celular, a través de la cual los iones deben progresar con el objeto de alcanzar los puntos de absorción.

El Ca es inmóvil en el interior de las plantas, de tal forma que las deficiencias de Ca^{2+}, aparecen en primer lugar en las hojas emergentes o en aquellos tejidos en formación (aún mostrándose deficiencias de Ca^{2+} en las hojas jóvenes, es posible que en las hojas adultas las concentraciones de Ca^{2+} sean las adecuadas). Ante carencias por Ca^{2+}, es habitual que el índice tallos aéreos:sistema radicular disminuya, ya que los primeros muestran una mayor sensibilidad frente a la carencia por Ca^{2+} que el sistema radicular (Clark, 1993).

Aún cuando el Ca^{2+} es considerado como un macronutriente y se acumula en las plantas a concentraciones relativamente elevadas, ha sido puesto en evidencia, que diversas funciones de la planta en las cuales el Ca^{2+} interviene, tienen lugar. incluso a concentraciones de Ca^{2+} muy bajas (Hanson, 1984).

1.3.4.3 Interacciones nutricionales

Un amplio número de interacciones entre el Ca y otros nutrientes minerales, ha sido puesto en evidencia (Clark, 1984; Hanson, 1984). Los iones que de una forma intensa inhiben la absorción de Ca son los citados a continuación: $H_3O^+, K^+, Na^+, Mg^{2+}, Al^{3+}$ y NH_4^+. El papel inhibidor que desempeña el ión NH_4^+ sobre la absorción de Ca^{2+}, es de especial interés, ya que la fertilización amoniacal de las plantas de cultivo, es un hecho cotidiano. Las soluciones nutritivas en cuyo contenido se encuentra el ión NH_4^+, pasan a presentar carácter ácido; la absorción

de cationes Ca^{2+} a pH ácido, es menor que en aquellas situaciones en las cuales los valores de pH son elevados, de tal forma que la absorción de Ca^{2+} se ve deprimida en mayor medida que el resto de cationes presentes en la solución (Marschner, 1995). Por otra parte, también ha sido observada la existencia de una interacción de naturaleza negativa entre el P y el Ca (Fageria et al., 2006; Fageria y Zimmermann, 1998).

1.3.5 Magnesio

1.3.5.1 Magnesio en el sistema suelo-planta

Las principales entradas de Mg^{2+} en el sistema son las prácticas de encalado, la fertilización magnésica, los restos de cosecha y enmiendas orgánicas, y la liberación por parte de los procesos de erosión de los minerales presentes en el suelo de forma natural. Las principales salidas del sistema son a causa de la absorción por las plantas y los procesos de lixiviación. La mayor parte del Mg^{2+} presente en el suelo, está en forma de minerales primarios, siendo muy pequeña la proporción de Mg^{2+}que se encuentra en forma orgánica.

La adición de Ca^{2+} al medio edáfico incrementa el riesgo de lixiviación del Mg^{2+}, ya que el Ca^{2+} se une de una forma más intensa a los coloides del suelo, de tal manera que el Mg^{2+}se encontrará en unas condiciones de mayor desprotección frente al fenómeno expuesto. Ante la existencia de condiciones ácidas en el medio de cultivo, los iones Al^{3+}y H_3O^+ desplazarán al ión Mg^{2+} del complejo de cambio, de tal forma que los procesos de lixiviación pueden sobrevenir. Como añadidura a lo anterior, el Mg^{2+} no se une de forma específica a los minerales de arcilla, tal como en el caso del K^+, siendo gran parte del mismo adsorbido en las posiciones interlaminares de los filosilicatos 2:1 (Mengel et al., 2001).

La afinidad de los cationes frente al complejo de cambio, es dependiente de la mineralogía de los coloides. Así por ejemplo, para el caso de la montmorillonita la afinidad mostrada por Ca^{2+} y Mg^{2+} es similar, pero en el caso de la vermiculita, la afinidad del Mg^{2+} es mucho mayor que la presentada por el Ca^{2+} (Camberato y Pan, 2000). La fracción de Mg no intercambiable, es la mayoritaria en el sistema suelo-planta; la proporción de Mg asociada a formas orgánicas, habitualmente supone menos del 1% del Mg total presente en el medio edáfico (Mengel et al., 2001). El transporte del Mg^{2+} hacia el sistema radicular de las plantas, tiene lugar, de forma principal, a través de los procesos de difusión y flujo de masas.

1.3.5.2 Funciones en la planta

Entre las funciones del Mg^{2+} en las plantas, destacan por su importancia aquellas en las cuales participa como activador enzimático y como componente de la molécula de clorofila. También actúa como soporte en el metabolismo de los fosfatos, los procesos respiratorios y la activación de diversos sistemas enzimáticos involucrados en el metabolismo energético (Fageria y Gheyi, 1999). Tisdale et al. (1985), mostró la función activadora del Mg^{2+} en la formación de las cadenas de polipéptidos constituyentes de los aminoácidos. Es también el Mg un elemento esencial en el desarrollo de la vida microbiana del medio edáfico, encontrándose vinculado al desarrollo de la vida bacteriana en el mismo, lo cual ha sido mostrado a

partir de las investigaciones llevadas a cabo por Jones y Huber (2007), los cuales estudiaron los efectos de la aplicación de carbonato mágnésico sobre la población bacteriana del suelo. Es requerido también para la preservación de la integridad estructural de los ribosomas, de tal forma que un 90% o más del Mg^{2+}celular se encuentra vinculado a estructuras del ribosoma. Está asociado también a los procesos de mitosis, metabolismo de los carbohidratos y fosforilación oxidativa en la fisiología de las células juveniles (Jones y Huber, 2007).

El Mg^{2+} es un elemento móvil en el interior de la planta, de tal forma que los síntomas de deficiencia, aparecen en primer lugar en hojas y tejidos adultos, caracterizándose principalmente la sintomatología de deficiencia de este elemento, por una clorosis internervial. El desarrollo radicular se ve reducido en las plantas deficientes en Mg, virando la coloración de las raíces hacia tonos granates (Fageria y Souza, 1991). El índice tallos aéreos:sistema radicular se incrementa ante situaciones carenciales de Mg^{2+}, ya que el desarrollo del sistema radicular se ve más seriamente afectado que el desarrollo de las estructuras caulinares (Clark, 1993).

1.3.5.3 Interacciones nutricionales

Ohno y Grunes (1985), publicaron que el ión K^{+} reducía la concentración de Mg^{2+} en las estructuras caulinares, a causa de la reducción en la translocación del Mg^{2+} desde el sistema radicular hasta las partes aéreas. En esa misma dirección apuntan los trabajos de Huang et al. (1990), los cuales inciden en señalar una reducción en la translocación del Mg^{2+} desde el sistema radicular hacia las partes aéreas a consecuencia de incrementarse las concentraciones de K^{+} en los tejidos del sistema radicular.

Wilkinson (1983), publicó que los niveles elevados de K^{+} en el medio edáfico, disminuían la absorción de Mg^{2+} por las plantas. Conclusiones similares obtuvieron Ologunde y Sorensen (1982) en medios de cultivo arenosos; hallaron que los niveles elevados de K^{+} disminuían de forma considerable las concentraciones de Mg^{2+} en las estructuras caulinares (este comportamiento también fue observado por Hannaway et al. (1982)), pero en la situación inversa (niveles elevados de Mg^{2+}) el antagonismo se presentaba de forma muy suave o simplemente no tenía lugar.

Spear et al. (1978) y Christenson et al. (1973), notificaron a través de sus publicaciones, la existencia de interacciones entre K^{+}, Ca^{2+} y Mg^{2+} en los procesos de absorción por parte de las plantas. En los estudios de estos autores, se concluye que estas interaciones son de naturaleza antagónica. Moore et al. (1961) y Maas y Ogata (1971), estudiaron la influencia del pH y el Ca^{2+} sobre la absorción de Mg^{2+} por las plantas; en ambos casos, se concluye que el incremento de las concentraciones de Ca^{2+} en la solución nutritiva, reducía la absorción de Mg^{2+} por parte de las plantas, viéndose este efecto depresivo más influenciado por una pérdida de capacidad de transporte por parte del sistema radicular, que por una posible causa de competencia entre Ca^{2+} y Mg^{2+} por los puntos de absorción. También Fageria (1983) y Schwartz y Bar-Yosef (1983), mostraron en sus publicaciones como los incrementos en las concentraciones de Ca^{2+} en soluciones nutritivas, disminuían la absorción de Mg^{2+} por parte de las plantas.

La fuerza con la cual el Mg^{2+} se encuentra vinculado a las sedes de intercambio, es un factor importante en los fenómenos de interacción entre cationes. En los filosilicatos de naturaleza 2:1, el Mg^{2+} es anclado de forma menos intensa que en el caso del Ca^{2+}, y este último, también es retenido de forma menos poderosa que el ión K^{+} (Barber, 1995). Pero esto anterior no se cumple para el caso de la caolinita y la materia orgánica.

La fertilización con NO_3^- generalmente incrementa la concentración de Mg^{2+} en las plantas a causa de la necesidad de mantenimiento del equlibrio entre cationes y aniones (Wilkinson et al., 2000). Así, ante el suministro de N en forma de NO_3^-, la busqueda de la neutralidad eléctrica se efectúa a través de la reducción en la síntesis de ácidos orgánicos, bien mediante la liberación de aniones $(OH^- \text{ y } HCO_3^-)$ a través del sistema radicular o bien mediante la absorción de cationes. Sin embargo, cuando el suministro de N se efctúa en forma de NH_4^+, la neutralidad eléctrica interna es mantenida bien mediante la liberación de H_3O^+ a través del sistema radicular o bien mediante la absorción de aniones (Wilkinson el al., 2000).

Interacciones positivas entre P y Mg^{2+} han sido notificadas en la literatura científica para diversas especies vegetales de cultivo (Wilkinson et al., 2000).

Por otra parte, una mayor tolerancia frente al Al^{3+} ha sido asociada a un incremento en los niveles de absorción de Mg^{2+} (Foy, 1984). De forma similar, Ali (1973), publicó una mayor resistencia frente a la toxicidad por Al^{3+} mediante el incremento de las concentraciones de $Ca^{2+}, Mg^{2+} \text{ y } K^{+}$ en la solución nutritiva, bien de forma individual o colectiva.

1.3.6 Azufre

1.3.6.1 Azufre en el sistema suelo-planta

De igual modo que en el caso del Nitrógeno, aunque no se procede a estudiar el comportamiento del Azufre en esta tesis doctoral, la inclusión de este nutriente mineral en la presente revisión bibliográfica introductoria, se antoja necesaria a consecuencia de su importancia como macronutriente.

Los requerimientos de S por parte de las plantas, son similares a los presentados en el caso del P, pero sin embargo, los estudios concernientes al primero son mucho menores.

La principal fuente de azufre en el sistema suelo-planta son las adiciones en forma de fertilizante o enmienda, y a través de la incorporación de restos de cosecha. En añadidura a lo anterior, las formas gaseosas $H_2S \text{ y } SO_2$ son liberadas a la atmósfera a partir de la combustión de combustibles de origen fósil y son depositadas en el suelo por medio de las precipitaciones. El dióxido de azufre (SO_2) cuando se combina con el agua (H_2O) da lugar al ácido sulfúrico (H_2SO_4), de tal forma que cuando este ácido se deposita en el medio edáfico vía precipitación, el proceso recibe la denominación de lluvia ácida. Las principales salidas de S del sistema suelo-planta son su absorción por parte de las especies vegetales, las pérdidas por procesos erosivos, los procesos de lixiviación, la inmovilización a la cual se ve sometido por procesos edáficos de naturaleza microbiana y la adsorción

por parte de los coloides del suelo. La adsorción se produce a través de un ligando con grupos hidroxilos en superficie, de tal forma que los grupos sulfato reemplaza a los grupos hidroxilo (OH^-) coordinados a Fe^{3+} ó Al^{3+} para formar enlaces de naturaleza covalente (Mengel et al., 2001). La capacidad de los coloides del suelo en la adsorción de sulfatos es dependiente del pH del suelo, disminuyendo a medida que el pH del suelo se incrementa. El orden en el cual los minerales coloidales del suelo adsorben sulfatos es el siguiente: caolinita > illita > bentonita (Mengel et al., 2001). La inmovilización del S en el sistema suelo-planta, está controlada por la relación C/S de la materia orgánica existente en el suelo. Stevenson (1986), publicó que cuando dicha relación en la materia orgánica añadida está por debajo de 200:1, entonces habrá una ganacia neta en SO_4^{2-}; sin embargo, cuando la relación se encunetre por encima de 400:1, habrá una pérdida neta. De forma similar, Brady y Weil (2002) comunicaron a través de sus experiencias que una relación C/S mayor de 400:1 generalmente conduce a una inmovilización de azufre por parte de los microorganismos del suelo. La relación C/N/S del suelo varía ampliamente en función de la localización, pero una media de cierta confianza para los agrosistemas se encuentra en torno a 140:10:1.3 (Stevenson, 1986).

El S está presente en los suelos tanto en forma orgánica como inorgánica, siendo no obstante la forma orgánica, la dominante en la mayor parte de los agrosistemas. Tabatabai y Bremner (1972), publicaron que entre un 95-98% del azufre de los suelos de Iowa, se encontraba en forma orgánica. De forma global, la materia orgánica del suelo contiene en torno a 50 g de azufre por kg de materia orgánica (Barber, 1995). EL S orgánico del suelo se divide en tres amplias fracciones: (1) ésteres de sulfato (compuesta por moléculas con enlaces C-O-S), (2) S vinculado al C (principalmente en forma de aminoácidos) y (3) S residual (Tabatabay, 1982; Tracy et al., 1990). Las formas orgánicas de S pueden ser mineralizadas por los microorganismos del suelo (la especie más común es *Thiobacillus thiooxidans*). Stevenson (1986), publicó que la mineralización del S se ve interrumpida pr temperaturas inferiores a 10 ºC pero se incrementó en el intervalo que va desde los 20 a los 40 ºC, disminuyendo a partir de este límite superior. La mineralización del S se ve ampliamente reprimida ante condiciones de escasa y excesiva humedad del suelo (<15% y >80%), siendo el contenido óptimo en torno a un 60% de la capacidad máxima de retención de agua del suelo (Stevenson, 1986).

El ión sulfato (SO_4^{2-}) presenta carga negativa, moviéndose fácilmente con el agua a través del perfil del suelo, de tal forma que se lava con mucha facilidad en suelos de textura arenosa.

La capacidad de un suelo para adsorber SO_4^{2-} es dependiente de un amplio número de propiedades físicas y químicas. Los factores que afectan a esta adsorción de SO_4^{2-} por los suelos incluyen el pH, la naturaleza de los cationes presentes, la presencia de aniones competidores, la fracción de Al^{3+} y Fe^{3+} extraible, la fracción de SO_4^{2-} extraible, el contenido en $C_{orgánico}$ y la naturaleza del horizonte edáfico. La cantidad de SO_4^{2-} retenido o adsorbido por los suelos, se ve incrementada a medida que se incrementan los contenidos de arcilla. La retención de SO_4^{2-} disminuye a medida que el pH del suelo se ve incrementado, de tal forma que el fenómeno de adsorción aparece como insignificante en muchos suelos cuyo pH es superior a 6,5 (Tabatabai y Bremner, 1972).

A consecuencia del elevado contenido en materia orgánica en los suelos de las regiones templadas, el contenido en S de estos suelos es generalmente superior al existente en los suelos de las regiones tropicales. La principal forma inorgánica en la cual el S está presente en los suelos, es en forma de sulfato. Este S en forma inorgánica, constituye en torno a un 5 a 10% del S total presente en el suelo (Neptune et al., 1975; Barber, 1995).

El proceso de oxidación del S elemental conlleva una acidificación del medio, de tal forma que en los suelos con condiciones alcalinas, el S es empleado como enmienda.

Correlaciones positivas significativas han sido halladas entre el contenido de materia orgánica y el S total en las capas superficiales del suelo por diversos investigadores (Pedraza y Lora, 1974; Neptune et al., 1975; Nor, 1981; Kang et al., 1981).

Freney y Boonjawat (1983), publicaron que las transformaciones sufridas por el S en los suelos encharcados son principalmente de naturaleza biológica y las principales reacciones son las siguientes: (1) mineralización de componentes orgánicos de azufre con liberación de compuestos inorgánicos de azufre; (2) inmovilización, o conversión de formas inorgánicas de azufre a formas orgánicas de azufre; (3) producción de sulfuros a través de la reducción de sulfatos u otros componentes inorgánicos de azufre; (4) producción de compuestos volátiles de azufre; y (5) oxidación del azufre elemental y de los compuestos inorgánicos de azufre.

1.3.6.2 Funciones en la planta

El S desempeña un buen número de papeles importantes en el desarrollo y crecimiento de las especies vegetales. Fageria y Gheyi (1999), resumen como principales las siguientes funciones del S en las plantas:

1. El S es un componente esencial en los aminoácidos cisteina y metionina, los cuales son esenciales en la formación de las proteínas.
2. Desempeña un papel fundamental en la activación enzimática.
3. Promueve la nodulación en leguminosas.
4. Es necesario en la formación de clorofila, aunque no es un constituyente de la misma.
5. La maduración de las semillas y los frutos, se ve retrasada ante estados carenciales de S en la planta.
6. Es requerido por las especies vegetales para la formación de nitrogenasa.
7. Incrementa la producción de proteína bruta en los forrajes.
8. Incrementa la producción de aceite en los cultivos cuyas destinados a tal fin.
9. Incrementa la resistencia al frío en las especies vegetales.
10. Incrementa la resistencia a la sequía de las especies vegetales.
11. Asiste en la producción de glucósidos que aportan características odoríferas y gustativas en cebolla, ajo y mostaza.
12. Es necesario para la formación de vitaminas y ciertas hormonas.

13. Se encuentra involucrado en reacciones de oxidación-reducción.
14. Aumenta la tolerancia de las plantas frente a los metales pesados.
15. Componente esencial de los sulfolípidos.
16. Los sulfatos en forma orgánica pueden prestar servicio en el incremento de la solubilidad de componentes orgánicos, lo cual puede resultar importante en situaciones de estrés salino (Clarkson y Hanson, 1980).
17. La fertilización de los suelos con S en forma de sulfato disminuye la potencialidad de diversos patógenos fúngicos existentes en el suelo (Klikocka et al., 2005; Haneklaus et al., 2007).

Los síntomas de deficiencia por S son a menudo observados en estadíos tempranos del ciclo de desarrollo, ya que el S puede ser fácilmente lixiviado en el perfil del suelo (Hitsuda et al., 2005).

Los síntomas de deficiencia son similares a los del N; no obstante, los síntomas de deficiencia por N aparecen en primer lugar en las hojas maduras, mientras que en el caso del S, estos síntomas se manifiestan en primer lugar en las hojas juveniles, ya que el S no es fácilmente translocado en el interior de la planta. El índice tallos aéreos:sistema radicular usualmente disminuye en las plantas afectadas por estados carenciales de S, ya que el desarrollo radicular se ve seriamente afectado (Clark, 1993).

1.3.6.3 Interacciones nutricionales

La interacción S-N es muy común, de tal forma que los requerimientos de S por las plantas se ven incrementados a medida que la disponibilidad de N en el medio aumenta. La principal razón para lo anterior, parece encontrarse en el hecho del incremento significativo que se produce en el crecimiento de las plantas ante las adiciones de N, lo cual implica una mayor demanda de S por la planta (Wilkinson et al., 2000). Soliman et al. (1992), publicaron que en suelos calcáreos, el S provoca un descenso en el pH del suelo, incrementándose la biodisponibilidad de micronutrientes como el Fe, el Mn y el Zn. La absorción del P, también puede verse beneficiada en los suelos calcáreos por las aplicaciones de S, a consecuencia de la disminución del pH. Shiratori y Miyoshi (1971) y Suzuki (1995) notificaron una interacción antagónica entre S y Zn. Rehm y Caldwell (1968), publicaron que la absorción de iones SO_4^{2-} fue mayor cuando el N fue añadido como nitrógeno amoniacal, pero la absorción de SO_4^{2-} cuando el N fue añadido en forma nítrica, fue muy similar a la situación en la cual no se producía ninguna adición de N.

Reisenauer (1963), publicó deficiencias de Mb en plantas cultivadas en medios edáficos cuyo contenido de Mb es bajo, pudiendo ser atribuida esta circunstancia a la competición por los puntos de absorción en el sistema radicular entre los aniones molibdato y sulfato, los cuales son similares en tamaño y carga.

1.3.7 Zinc

1.3.7.1 Zinc en el sistema suelo-planta

Las principales entradas de Zn en el sistema suelo-planta involucran a minerales presentes en el suelo, restos de cosecha, así como fertilizantes químicos

y enmiendas de naturaleza orgánica, mientras que las principales salidas, son debidas a las extracciones de cosecha y los procesos erosivos. Una parte del Zn puede ser inmovilzado por los coloides del suelo y la actividad microbiana. Minerales relativamente insolubles, constituyen más del 90% del Zn presente en los suelos (Barber, 1995). El Zn está presente en la solución del suelo en forma de catión divalente (Zn^{2+}). No experimenta procesos de reducción en el suelo a consecuencia de su naturaleza electropositiva (Krauskopf, 1972). Las formas de Zn que pueden afectar a la biodisponibilidad del mismo para las plantas, son el Zn en forma soluble, el Zn en posiciones de intercambio, el Zn adsorbido sobre la superficie de coloides minerales y materia orgánica, y el Zn sustituido por Mg^{2+} en las láminas cristalinas de los minerales de arcilla (Tisdale et al., 1985).

El contenido en Zn de los suelos varía ampliamente en función de la naturaleza del suelo, las prácticas de manejo adaptadas, las condiciones climáticas, las especies vegetales cultivadas y la intensidad del cultivo.

El Zn es relativamente inmóvil en el suelo, siendo los procesos de difusión, los mecanismos predominantes en el transporte del Zn hacia los sistemas radiculares vegetales (Tisdale et al., 1985). Los agentes quelatantes producidos por los microorganismos o excretados por las raíces de las plantas, pueden también jugar un papel importante en el transporte del Zn hacia los sistemas radiculares vegetales (Stevenson, 1986). El Zn del suelo puede estar: (1) en la solución del suelo en estado iónico o complejado en especies orgánicas; (2) en las sedes de intercambio; (3) complejado con la materia orgánica; (4) ocluído en óxidos e hidróxidos de Al, Fe y Mn; y (5) atrapado en los minerales primarios y secundarios. De acuerdo a las diferentes fracciones del suelo en las cuales se ubica el Zn, varía su disponibilidad para las plantas, de tal forma que el Zn que se encuentra en la solución del suelo y ocupando las sedes de intercambio es relativamente disponible para la planta de una forma inmediata, mientras que el Zn atrapado en los minerales primarios y secundarios, es relativamente no disponible para las plantas (Iyengar et al., 1981).

Los procesos de sorción del Zn en el suelo, se ven influenciados por el pH de ese suelo, los minerales de arcilla presentes, el contenido de materia orgánica, el contenido en óxidos de Fe y Al y el contenido en carbonatos. La quelación metálica es un factor muy influyente en la solubilidad y el movimiento de los metales en el suelo Cleveland y Rees, 1981). Krauskpof (1972) y Lindsay (1979), publicaron que el Zn forma complejos solubles con ligandos orgánicos como el EDTA (ácido etilendiamintetraacético) y DTPA (ácido dietilentriaminopentaacético). Elrashidi y O'Connor (1982a), publicaron que la presencia de EDTA en la suspensión que conforma el suelo, disminuía de forma significativa la sorción de Zn; estos autores, también reseñaron que el Cu fue más efectivo que el Ni en la disminución de la sorción de Zn. Diversos estudios muestran que el Cu y el Zn son afectados de manera intensa por procesos de sorción en los suelos a pesar de la presencia de elevadas concentraciones de otros cationes como Ca^{2+}, Na^{+} y K^{+} (Cavallaro y McBride, 1984). Las láminas de silicatos de arcilla ligan el Zn en procesos de intercambio iónico, fijación y reacciones de hidrólisis; la dependencia de estas reacciones frente al pH, se cree que es debida principalmente a la tendencia de las arcillas para participar en procesos de sorción de forma preferencial con especies hidrolizadas (Tiller, 1968). La materia orgánica participa también en procesos de sorción con este metal (Bloom y McBride, 1979); esta reacción es dependiente del

pH, tanto por la hidrólisis del metal, como por la naturaleza de ácido débil de los puntos de intercambio de la materia orgánica. Saeed y Fox (1979), a través de sus estudios en suelos no sometidos a programas de fertilización, concluyeron que aquellos suelos cuyos coloides presente carga constante de forma predominante, adsorben más Zn que aquellos suelos en los cuales predominan los coloides de carga variable. Estos autores concluyeron también, a través de sus experiencias, que las adiciones de fertilizantes fosfatados a los suelos, incrementaba la adsorción del Zn a causa del incremento de la carga negativa en el complejo de óxidos de Fe y Al.

Shuman (1975), constató el papel que desempeña la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en el control de la cantidad de Zn desplazado de la solución del suelo, concluyendo que a medida que la CIC del suelo aumentaba, menor era la saturación por Zn de las sedes de intercambio.

El pH del suelo es la variable rectora en la regulación de la movilidad de los metales, incluido el Zn, en el suelo, existiendo altas correlaciones entre el pH y la facilidad con la que el metal puede ser extraído (criterio comúnmente aceptado para describir la naturaleza lábil del metal). La solubilidad de los minerales de Zn disminuye en proporción de una centena por cada incremento de unidad del pH (Lindsay, 1979). La adsorción, es el factor que contribuye con más intensidad a la existencia de bajas concentraciones de Zn en la solución del suelo; el pH del suelo afecta a la adsorción del Zn, tanto por la modificación del número de puntos disponibles para el proceso de adsorción como por las modificaciones en las concentraciones de las diferentes especies de Zn, cuya preferencia en la adsorción es variable en función de la naturaleza de la misma (Barrow, 1986).

La solubilidad y disponibilidad del Zn para las plantas, varía ante condiciones de encharcamiento del suelo, de tal manera que si la concentración de la mayoría de los nutrientes minerales se ve incrementada cuando un suelo se ve sometido a procesos de encharcamiento, la concentración de Zn en estado soluble disminuye (Ponnamperuma, 1977). En los suelos ácidos, la disminución en las concentraciones de Zn soluble, puede ser atribuida al incremento en los valores de pH que sigue a los procesos de reducción del suelo. En los suelos calcáreos, el pH de los suelos se ve disminuido ante procesos de encharcamiento (Ponnamperuma, 1972), y la solubilidad del Zn se ve incrementada. En condiciones reductoras del suelo, las concentraciones de Fe^{2+} y Mn^{2+} se ven incrementadas, lo cual podría inhibir los procesos de absorción de Zn por parte de las plantas.

1.3.7.2 Funciones en la planta

El Zn presenta diversas funciones de naturaleza bioquímica en las especies vegetales. Estas funciones se resumen en las siguientes:

1. El Zn es necesario en la síntesis de la clorofila y de los carbohidratos.
2. El Zn auxilia el desarrollo de las plantas a través de su participación en sistemas ezimáticos (junto con el Cu, se ha mostrado como constituyente de la superóxido dismutasa).
3. Está intensamente vinculado en el metabolismo del N en la planta.

4. Es requerido en la síntesis de triptófano; puesto que este aminoácido es precursor del ácido indolacético (AIA), de forma indirecta el Zn influencia la formación de AIA.
5. El Zn se encuentra vinculado al metabolismo de de las plantas asociado a la síntesis de almidón.
6. Los procesos de floración y desarrollo del fruto, se ven drásticamente atenuados ante condiciones severas de carencia de Zn.
7. De igual forma que el Ca^{2+}, el Zn^{2+} también repercute en la integridad de las membranas biológicas. La pérdida de dicha integridad a causa de las deficiencias de Zn, contribuye a un incremento de la susceptibilidad frente a los hongos patógenos (Sparrow y Graham, 1988).
8. El Zn beneficia el desarrollo del sistema radicular de las especies vegetales.
9. En determinadas metaloenzimas, el Zn^{2+} puede intercambiarse con el Mg^{2+} y Mn^{2+} (Clarkson y Hanson, 1980).
10. Klug y Rhodes (1987), publicaron como el Zn desarrolla un papel esencial en la expresión de los genes.
11. La actividad de la enzima alcohol deshidrogenasa (ADH) se ve ralentizada en condiciones de carencia de Zn (Romheld y Marschner, 1991). Esta enzima desarrolla un papel importante en la respiración anaeróbica del sistema radicular.
12. La anhidrasa carbónica (AC) es una enzima involucrada en la fijación de CO_2 en las plantas superiores, principalmente en las plantas C_4, constituyendo el Zn, parte vital de su estructura (Cakmak y Engels, 1999).
13. La disminución de la actividad fotosintética obsevada en las plantas deficientes en Zn, puede ser debido, en parte, a una reducción de la síntesis de clorofila y a anormalidades estructurales en los cloroplastos (Alloway, 2004).
14. La deficiencia por Zn provoca una disminución en la eficiencia en el uso de los recursos hídricos, lo cual conlleva una pérdida de turgor en las células vegetales (Duffy, 2007).

El Zn no es especialmente móvil en las plantas, de tal manera que los síntomas aparecen en primer lugar en las hojas en estadíos juveniles (Duffy, 2007). Marschner y Cakmak (1989), publicaron que la deficiencia por Zn se veía intensificada ante elevadas tasas de iluminación, sugiriendo la participación de radicales superóxido en el desarrollo de la sintomatología de estados carenciales por Zn.

1.3.7.3 Interacciones nutricionales

Bowen (1969) y Kochain (1991) publicaron como la competitividad ejercida por el Cu^{2+} inhibía la absorción de Zn^{2+}, sugiriendo que ambos iones competían por el mismo punto de absorción en el sistema radicular vegetal. De igual forma se posicionaba Alloway (2004), añadiendo que este comportamiento era recíproco entre ambos iones.

Alloway (2004), publicó que la translocación de Zn desde las raíces se incrementó en respuesta a la fertilización con Mn. No obstante, elevadas concentraciones combinadas de Mn y Fe en la solución nutritiva, pueden inhibir la

absorción de Zn por parte de las plantas. Las plantas deficientes en Zn, pueden absorber grandes cantidades de B, provocando la aparición de sintomatología por toxicidad (Graham et al., 1987; Singh et al., 1990; Alloway, 2004).

Han sido notificadas interacciones entre Zn y P tanto de naturaleza positiva como negativa (Sumner y Farina, 1986; Wilkinson et al., 2000). El desarrollo de síntomas carenciales por Zn y su aparente intensificación a consecuencia de una fertilización posterior de naturaleza fosfatada, ha sido notificado a partir de las experiencias llevadas a cabo por Christensen y Jackson (1981). Los mecanismos propuestos para explicar esta interacción entre Zn y P incluyen los siguientes: (1) interacciones a nivel edáfico P-Zn; (2) dilución del Zn en los tejidos vegetales como respuesta al desarrollo provocado por el P; (3) disminución en la absorción de Zn por la planta o en el proceso de translocación como consecuencia de las adiciones de P en forma de fertilizante; (4) interferencias generadas por el P en el empleo del Zn por parte de la planta (Olsen, 1972). Loneragan et al. (1979), publicaron que el P provocaba una intensificación en los enlaces del Zn con los óxidos e hidróxidos de Fe y Al, lo cual puede presentar gran trascendencia en función de la naturaleza de los suelos. Christensen y Jackson (1981), plantean que la aparente acentuación de los síntomas carenciales de Zn ante aplicaciones de fertilizantes de naturaleza fosfatada, es más bien una posible sintomatología de toxicidad por P a consecuencia de la acumulación del mismo en plantas con estados carenciales de Zn. Loneragan et al. (1982), publicaron que la combinación de reducidas concentraciones de Zn y elevadas de P en la solución del suelo, puede incrementar la acumulación de P en las hojas adultas, provocando posibles toxicidades, y en consecuencia, los síntomas de toxicidad por P pueden ser confundidos con síntomas de deficiencia por Zn. El exceso de P puede interferir con las funciones metabólicas que lleva a cobo el Zn. Alloway (2004), publicó que niveles elevados de P en el suelo, pueden conducir a una reducción en la infección radicular por micorrizas de naturaleza vesículoarbuscular, lo cual conllevaría a su vez una reducción de la superficie de absorción del sistema radicular.

Las deficiencias por Zn incrementan la absorción de B, de tal forma que las aplicaciones de Zn, pueden aliviar los procesos de toxicidad por B, reduciendo la absorción del mismo (Grewal et al., 1999). El potasio provoca un incremento de la absorción radicular de Zn, influyendo también de forma positiva en los procesos de translocación de este nutriente (Grunes et al., 1998). Mandal et al. (2000), publicaron que elevadas concentraciones de Fe^{2+} y Mn^{2+} en la solución del suelo presentaban un efecto antagónico sobre la absorción de Zn^{2+}. Giordano et al. (1987), publicaron el siguiente orden de interferencia sobre la absorción de Zn^{2+}: Fe = Cu > Mg > Mn > Ca.

1.3.8 Cobre

1.3.8.1 Cobre en el sistema suelo-planta

Las principales fuentes de entrada en el sistema suelo-planta son los fertilizantes químicos y enmiendas orgánicas, los restos de cosecha y los procesos de erosión de los minerales; los principales procesos por los cuales el Cu sale de este sistema suelo-planta, son las extracciones por parte de las plantas, los

procesos erosivos y de lixiviación del suelo, y la inmovilización por parte de la materia orgánica y microorganismos del suelo.

El ión Cu^{2+} presenta una gran afinidad a la materia orgánica del suelo en comparación con otros cationes de naturaleza divalente; el orden de afinidad podría ser el siguiente: Cu > Ni > Pb > Co > Ca > Zn > Mn > Mg (Schnitzer y Skinner, 1967; Mengel et al., 2001).

Aproximadamente, un 50% del Cu presente en los suelos se encuentra en forma insoluble y no disponible para las plantas, un 30% se encuentra vinculado a ligandos orgánicos, un 15% está en forma de óxido y un 5% está disponible para la absorción por parte de las plantas (Barber, 1995). El ión predominante en el medio edáfico por debajo de pH 6.9 es el Cu^{2+}, mientras que la especie $Cu(OH)_2$ predomina cuando el pH se encuentra por encima de este valor (Lindsay, 1979). La solubilidad del Cu en los suelos, está intensamente vinculada a los pH existentes en los mismos, a consecuencia de los procesos de hidrólisis del ión Cu^{2+} en suelos cuyo pH es superior a 6.0 y a los fenómenos de extracción de los iones Al^{3+} y H_3O^+ de las sedes de intercambio a medida que el pH de los suelos ácidos se ve incrementado (Cavallaro y McBridge, 1980).

El Cu es hallado, principalmente, en la solución del suelo, ligado a complejos de naturaleza orgánica (Geering y Hodgson, 1969), siendo las moléculas orgánicas de bajo peso molecular las que dan lugar a complejos de una forma más efectiva (Thornton, 1979). Así pues, la disponibilida de Cu para el sistema radicular de las plantas, aparentemente involucra a componentes orgánicos de bajo peso molecular que quelan los iones Cu^{2+} deplazándolos a la solución del suelo; estos componentes orgánicos, pueden ser exudados por las raíces de las plantas (Hale et al., 1971).

La biodisponibilidad del Cu se encuentra muy influenciada por el pH del suelo; no obstante, la influencia del pH sobre la biodisponibilidad del Cu, es menor que la que muestra sobre el Fe y el Mn (Fageria, 2000). Los suelos con elevados contenidos en materia orgánica (> 10%), secuestran de una forma muy rápida los iones Cu^{2+}, reduciendo e incluso suprimiendo la biodisponibilidad del mismo.

1.3.8.2 Funciones en la planta

El Cu es constituyente de un número importante de enzimas oxidasas, entre las cuales se incluyen citocromo oxidasa y ácido ascorbico oxidasa. Participa de forma importante en los procesos de fotosíntesis y metabolismo de proteínas y carbohidratos (Fageria et al., 2002). El Cu, es el componente metálico de tres tipos de proteínas: Plastocianinas, involucradas en la transferencia de electrones; peroxidasas, las cuales oxidan los monofenoles a difenoles; y las proteínas multi-Cu, qué actúan como oxidasas (Sandermann y Boger, 1983; Evans et al., 2007).

El Cu se encuentra involucrado en el proceso de la fotosíntesis, de tal forma que en aquellas plantas deficientes en Cu, la tasa fotosintética se muestra sensiblemente reducida. En las plantas con carencias en Cu, los carbohidratos de naturaleza soluble disminuyen durante el período de desarrollo vegetativo, presentándose dificultades en los procesos de formación de los granos de polen y

de la fertilización en si; de forma consecuente, las producciones de cosechas se ven mermadas (Marschner, 1995).

El Cu se encuentra involucrado en la formación de la pared celular y, de igual forma que otros nutrientes minerales, en el transporte de electrones y en las reacciones de oxidación (Tisdale et al., 1985). La liginificación de la pared celular, se muestra afectada en situaciones de plantas con carencias de Cu, que en caso de los cereales, puede suponer que se muestren más proclives al fenómeno del encamado (Marschner, 1995).

El Cu estimula el desarrollo del sistema radicular, lo cual presenta especial importancia para el sumunistro hídrico y de nutrientes a las especies vegetales (Fageria, 1992, 2004).

El Cu presenta un comportamiento inmóvil en el interior de la planta, de tal forma que en los casos de deficiencia, la sintomatología se muestra en primer lugar en las hojas en estadíos juveniles (Fageria y Barbosa Filho, 2006).

1.3.8.3 Interacciones nutricionales

La fertilización nitrogenada acentúa las deficiencias de Cu en las plantas; el nivel de deficiencia crítico de cu en los tejidos vegetales, se ve incrementado a medida que el suministro de N aumenta (Marschner, 1995). Fageria (2002a), observó a través de aplicaciones de Cu, un efecto interactivo sinérgico sobre la absorción de P, K y Mn; sin embargo, el efecto fue el opuesto en las concentraciones de Ca, Mg y Fe en los tejidos vegetales. Bowen (1969), publicó la existencia de importantes evidencias acerca de una fuerte inhibición del Cu sobre la absorción del Zn y viceversa.

El exceso de Cu, interfiere en la capacidad de la planta para absorber y/o translocar otros nutrientes minerales (Fageria, 2002a), inhibiendo la elongación radicular y afectando de forma adversa en células radiculares a la permeabilidad de su membrana celular (Woolhouse y Walker, 1981). El exceso de Cu, también presenta un efecto destructivo sobre la integridad de la membrana cloroplasmática, lo cual conduce a una disminución de la actividad fotosintética (Eleftheriou y Karataglis, 1989), afectando todo ello a la absorción de otros nutrientes minerales.

Ouzounidou et al. (1995), publicaron una disminución en la absorción de Fe a causa de aplicaciones de Cu, mientras que en el caso del Ca y el K, la interacción fue inexistente. Lexmond y van der Vorm (1981), publicaron interacciones de carácter antagónico en Fe y P, en respuesta a aplicaciones de Cu. Sin embargo, Mocquot et al. (1996), no observaron cambios significativos en la absorción de Ca, K, Fe y P en respuesta a aplicaciones de Cu.

1.3.9 Hierro

1.3.9.1 Hierro en el sistema suelo-planta

Las principales adiciones de Fe en el sistema son los fertilizantes inorgánicos y las enmiendas orgánicas, los restos de cosecha y la liberación desde los

materiales parentales del suelo. Las principales salidas del sistema son las extracciones por parte de las especies vegetales, los procesos erosivos del suelo y los fenómenos de inmovilización por parte de la biomasa microbiana edáfica. El principal aspecto de la química del Fe en el suelo, no es la cantidad de este metal presente en el suelo, sino todo lo concerniente a su solubilidad y biodisponibilidad (Follett et al., 1981). La solubilidad del Fe en los suelos presenta un especial interés para los científicos especializados en la nutrición vegetal y la ciencia edáfica, sin embargo un conocimiento minucioso acerca de su química en el suelo, aún se mantiene esquiva (Schwab y Lindsay, 1983). El hierro amorfo en la forma $\mathrm{Fe(OH)_3}$, es probablemente la principal fuente de suministro de Fe para la absorción de las plantas (Barber, 1995). Durante los procesos de meteorización, los minerales con capacidad de suministro de Fe, liberan el mismo, precipitando en forma de óxidos e hidróxidos de Fe.

La forma iónica divalente $\mathrm{Fe^{2+}}$ está menos intensamente ligada a lsa superficies coloidales edáficas que en el caso del $\mathrm{Co^{2+}, Cu^{2+}}$ y $\mathrm{Zn^{2+}}$. Cuando elstos elementos sufren procesops de oxidación a estados de valencia superiores, pueden dar lugar a óxidos y fosfatos insolubles, situando a estos elementos en un estado de menor susceptibilidad frente a los procesos de lixiviación, perio también en peores condiciones de biodisponibilidad. La solubilidad del Fe en los suelos está controlada por $\mathrm{Fe(OH)_3}$ en los suelos bien aireados, por $\mathrm{Fe_3(OH)_8}$ (hidróxido ferroso-férrico metaestable) en los suelos moderadamente aireados, y por $\mathrm{FeCO_3}$ (siderita) en los suelos con condiciones reductoras (Lindsay y Schwab, 1982). Las especies $\mathrm{Fe(OH)_2^+}$ y $\mathrm{Fe(OH)_3}$ generadas a partir de procesos de hidrólisis del $\mathrm{Fe^{3+}}$ (ión férrico), son las principales especies de Fe inorgánico en la solución del suelo, pero son mantenidas a concentraciones demasiado reducidas para protagonizar un suministro adecuado a las especies vegetales.

La disolución y precipitación de los óxidos férricos son el principal factor en el control de la solubilidad del Fe en los suelos bien aireados. La actividad del $\mathrm{Fe^{3+}}$ mantenida por estos óxidos está muy condicionada por el pH (Lindsay y Schwab, 1982). El carbonato cálcico presenta una gran capacidad tampón en los suelos en el rango de pH 7.4 – 8.5; en este rango de pH, los óxidos de hierro alcanzan su solubilidad mínima y las condiciones de deficiencia de Fe en las plantas es muy severa. Los óxidos de Fe^{3+} presentan diferente solubilidad, la cual disminuye en el sigiuiente orden (Lindsay, 1979):

$$\mathrm{Fe(OH)_3\ (amorfo)} > \mathrm{Fe(OH)_3(hidróxido\ férrico)} > \mathrm{Fe_2O_3(maghemita)} > FeOOH\ \mathrm{(lepidocrocita)} > \mathrm{Fe_2O_3(hematita)} > FeOOH\ (goetita)$$

Si las sales solubles de Fe son añadidas a los suelos bien aireados, rápidamente precipitan a $\mathrm{Fe(OH)_3}$ (amorfo). La suma de las diversas especies de hidrólisis procedentes del ión férrico en medio acuoso y el propio ión férrico, constituyen el Fe inorgánico soluble en el suelo. Según Olomu et al. (1973), la principal fuente de Fe soluble, la constituyen los complejos orgánicos solubles.

Uno de los más importantes factores que afectan a la movilización e inmovilización del Fe en el suelo, son las condiciones de drenaje del mismo. El modo y el grado en el que la aireación del suelo altera la química del Fe en el suelo, es bien conocida. La oxidación del Fe en el suelo, es un proceso reversible. A medida

que el drenaje de los suelos se ve impedido y el potencial de oxidación (Eh) se aproxima a 0.2 V, los óxidos de Fe^{3+} pueden ser reducidos.

Los procesos redox de la química del Fe en suelos encharcados, ha recibido una considerable cantidad de atención por parte de la comunidad científica. Una de las razones de este interés, es el efecto dominante que el Fe presenta en la química de los suelos con condiciones reductoras. La concentración de Fe soluble en los suelos en condiciones reductoras, se incrementa acausa de la disolución de los óxidos de Fe libres (Patrick y Mahapatra, 1968). Sah et al. (1989), demostraron que es difícil predecir la naturaleza y la magnitud de las transformaciones que sufre el Fe en los suelos sometidos a condiciones reductoras, sin tener en cuenta la temperatura y las fuentes de energía (materia orgánica), ya que estos factores determina la actividad microbiana y, finalmente, el potencial redox (Eh) del suelo.

El incremento de Fe, tanto en la solución del suelo como en estado intercambiable, se ve favorecido por una disminución, tanto del potencial redox como del pH; Gotoh y Patrick (1974), establecieron los potenciales redox críticos para la reducción del hierro y su consecuente disolución para una serie de valores de pH. La distribución de Fe en la fracción soluble e intercambiable, es muy dependiente de los valores de pH del suelo.

La principal, si bien no la exclusiva, forma en la cual el Fe es absorbido por las especies vegetales (excepto en las gramineas monocotiledóneas) es Fe^{2+} (Chaney et al., 1972). No obstante, en suelos aireados , el ión férrico (Fe^{3+}) es la forma predominante, de tal forma que este debe de verse sometido a un proceso de reducción, dando lugar a la forma ferrosa (Fe^{2+}) para su posterior absorción por parte de las plantas.

Marschner et al. (1986), publicó el hecho de la existencia de al menos dos tipos de estrategias diferentes en la respuesta radicular inducida por la deficiencia de Fe, las cuales conducen a un incremento tanto en la movilización del Fe en la rizosfera como a la tasa de absorción de Fe. La *Estrategia I* es hallada en todas las dicotiledóneas y las monocotiledóneas, a excepción de las gramíneas; esta estrategia, se caracteriza por un incremento en la actividad de la enzima reductasa ubicada en la membrana plasmática de las células radiculares, lo cual conlleva a un incremento de la tasa de reducción de Fe^{3+} y la correspondiente disociación de los quelatos-Fe^{3+} (**Figura nº 5**).

Las especies gramíneas adoptan una estrategia diferente, denominada como *Estrategia II*, la cual es similar a la estrategia empleada por sistemas bacterianos para la adquisición de Fe (Mori,1999; Expert, 2007). En esta estrategia, las plantas liberan, a través de su sistema radicular, fitosideróforos de naturaleza reductora hacia la rizosfera.

1.3.9.2 Funciones en la planta

Es esencial para la síntesis de la clorofila. Se encuentra involucrado en la fijación del nitrógeno, en la fotosintésis y en los procesos de transferencia de electrones (Bennett, 1993). Como transportador de electrones, está involucrado en las reacciones de oxidación-reducción (Follett et al., 1981). Es requerido en la

síntesis proteica, siendo constituyente de diversas enzimas, estando involucrado en sistemas enzimáticos asociados a los procesos de respiración (Bennet, 1993). La función realizada en grupos catalíticos por el Fe, depende de su estructura electrónica, la cual puede sufrir cambios de naturaleza reversible a través de diversos estado de oxidación. La síntesis de clorofila y de las estructuras tilacoidales, así como el proceso fotosintético, son dependientes de la integridad de diversas proteínas en cuya constitución participa el Fe (Imsande, 1998). La actividad de la enzima ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa/oxigenasa (Rubisco), se ve reducida ante condiciones carenciales de Fe (Expert, 2007). Fageria (1992), observó como el suministro de Fe hasta alcanzar niveles adecuados en solución nutritiva, promovía el desarrollo del sistema radicular.

El Fe presenta una movilidad limitada en las plantas, no translocándose desde los tejidos adultos a los nóveles. La mayoría de las plantas cultivadas, se muestran más susceptibles a la deficiencia por Fe en los estadíos tempranos de su desarrollo, de tal manera que si la deficiencia se muestra severa y prolongada en el tiempo, la planta muere. En la identificación de estados carenciales de Fe en las plantas cultivadas, los síntomas visuales prestan un mayor servicio que las analíticas foliares, ya que ha sido observado que el contenido total de Fe en las hojas con sintomas cloróticos, puede ser mayor que en aquellas hojas en las cuales los síntomas de carencia brillan por su ausencia, de tal manera que la planta puede mantener el Fe en forma inactiva como proteína (ferritina) (Seckback, 1982) o como fosfatos-Fe (Loeppert y Hallmark, 1985).

1.3.9.3 Interacciones nutricionales

Ha sido publicada una interacción negativa en la biodisponibilidad del Fe en medios de cultivo frente a P, Zn, Cu y Mn (Follett et al., 1981). La absorción específica del Fe disminuye con incrementos en el suministro de P a consecuencia de la interacción fisiológica P-Fe. La inhibición en la absorción de Fe por parte del P, puede estar vinculada con la competencia ejercida con el Fe^{2+} en el sistema radicular y con posibles interferencias en la reducción del Fe^{3+} en la solución del suelo (Chaney y Coulombe, 1982).

Las interacciones entre Fe y Mo han sido observadas en diferentes especies vegetales, pero no han sido aún bien comprendidas. Follett et al. (1981), publican la aparición de síntomas de clorosis por carencia de Fe, ante la existencia de concentraciones elevadas de Mo en el medio de cultivo. Las concentraciones elevadas de Ca^{2+} inhiben la absorción de Fe, lo cual podría constituir, una de las razones por las cuales las deficiencias en Fe aparecen en las plantas cultivadas en medios con concentraciones elevadas de carbonato cálcico (Barber, 1995). La absorción de $N - NO_3^-$ por parte de la planta, puede provocar incrementos del pH a causa de la liberación de iones OH^-, dando lugar por lo tanto, a una disminución en la solubilidad y capacidad de absorción por parte de las plantas del Fe; lo opuesto puede suceder, cuando las plantas absorben $N - NH_4^+$. Las deficiencias por K pueden causar estragos en el movimiento del Fe en el interior de las plantas (Tisdale et al., 1985).

1.3.10 Manganeso

1.3.10.1 Manganeso en el sistema suelo-planta

De igual manera que en el caso del Fe, las principales entradas de Mn en el sistema suelo-planta son los fertilizantes químicos y las enmiendas orgánicas, así como la liberación de Mn procedente de los fenómenos de meteorización de los materiales parentales del suelo. Las principales salidas del sistema son las extracciones por parte de las especies vegetales, los procesos erosivos y de lixiviación del suelo, y los fenómenos de inmovilización por parte de la biomasa microbiana edáfica. La química del Mn en el suelo es compleja, ya que en los medios naturales el Mn se presenta en diversos estados de oxidación (Mn^{4+}, Mn^{3+} y Mn^{2+}) (Foth y Ellis, 1988).

El Mn en forma Mn^{4+} y Mn^{3+}, aparece en las fases sólidas de los suelos convenientemente aireados, mientras que la forma Mn^{2+} es la predominante en aquellos suelos donde se dan condiciones reductoras. El Mn en la forma Mn^{4+} es ligeramente soluble, mientras que en la forma Mn^{3+}, semuestra inestable en la solución del suelo; por lo tanto, la forma Mn^{2+} representa la única forma de Mn soluble importante en los suelos. El estado redox de los sistemas acuosos afecta intensamente a la solubilidad y disponibilidad del Mn (Schwab y Lindsay, 1983).

Los óxidos de manganeso, son las formas más comunes de Mn mineral en los suelos, incluyendo entre los mismos a la pirolusita (MnO_2), la manganita ($MnOOH$) y la hausmanita (Mn_3O_4) (Barber, 1995). Tisdale et al. (1985) y Foth y Ellis (1988), publicaron que un 80-90% del Mn presente en la solución del suelo esta complejado con moléculas orgánicas. Shuman (1985), publicó por su parte, que el Mn en el suelo se encuentra principalmente en forma orgánica y en forma de óxido.

En los sistemas naturales, el Mn se encuentra presente en forma de nódulos de óxidos de manganeso mixturados con óxidos de hierro y recubriendo minerales de arcilla y otras partículas del suelo (McKenzie, 1989). La dinámica y la biodisponibilidad del Mn en el suelo está determinada por por diversos factores, entre los cuales se incluyen el pH, el potencial redox, la naturaleza y concentración de los diversos cationes y aniones presentes en el suelo, la composición mineralógica de las arcillas del medio, el contenido de materia orgánica y los microorganismos existentes en el mismo. La biodisponibilidad del Mn es más elevada en los suelos con naturaleza ácida, a causa de la mayor solubilidad de los componentes de Mn en las condiciones de pH que presentan estos suelos. Adams y Wear (1957), establecieron que la solubilidad del Mn en los suelos aireados es extremadamente dependiente del pH. Los valores de pH inferiores a 6,0 favorecen la reducción del Mn y la aparición de la forma divalente (Mn^{2+}) biodisponible; valores de pH superiores favorecen los procesos de oxidación a la forma iónica Mn^{4+}, a partir de la cual se generan los óxidos insolubles $(MnO_2, Mn_2O_3 \text{ y } Mn_3O_4)$ (Stevenson, 1986).

Otro parámetro que afecta profundamente la solubilidad del Mn en los suelos es el potencial redox (Eh). La transformación del Mn^{4+} a Mn^{2+}, tiene lugar cuando el potencial redox de los suelos se encuentra en el intervalo 200 – 400 mV (Tisdale et al., 1985), que corresponde a condiciones de reducción moderadas. El proceso de reducción del Mn es descrito por Fageria et al. (2003b) a través de la siguiente ecuación:

$$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \leftrightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$$

Modelos termodinámicos, predicen que el Mn es reducido y solubilizado con una mayor facilidad que el Fe, presentando por lo tanto una mayor movilidad en los suelos (McDaniel et al., 1992). Los iones Fe y Mn tienen un radio iónico similar, de tal forma que el Mn puede sustituir fácilmente al Fe en las estructuras cristalinas (Klein y Hurlbut, 1985). La estabilidad del ión Mn muestra una gran dependencia por el pH y el potencial redox (Lindsay, 1979; Bohn et al., 2001).

Diversos investigadores, han mostrado a través de sus publicaciones la acumulación de Mn en los horizontes superficiales del suelo, sugiriendo que este Mn se encuentra asociado con la fracción orgánica (McDaniel y Buol, 1991). Bloom (1981) y Gambrell y Patrick (1982), han sugerido que los iones Mn^{2+} hidratados forman complejos de esfera externa con los grupos carboxilo de la materia orgánica del suelo; este mecanismo, explicaría el hecho de que el Mn se encuentra vinculado a la materia orgánica de un modo más débil que otros metales como Fe, Cu y Zn.

1.3.10.2 Funciones en la planta

Sus principales funciones en la planta, se resumen en las siguientes Fageria y Gheyi (1999):

1. El Mn está indirectamente relacionado con la síntesis de clorofila.
2. Se encuentra considerado como constituyente de diversas enzimas respiratorias.

3. Activa varias reacciones metabólicas importantes en las especies vegetales.
4. Acelera los procesos de germinación y madurez.
5. Se encuentra involucrado en la evolución que sigue el O_2 en la fotosíntesis.
6. Está involucrado asimismo en reacciones de oxidación-reducción y de transferencia de electrones.
7. Participa como componente estructural de diversas metaloproteínas.
8. Se encuentra involucrado en el metabolismo del Fe así como en la asimilación del $\mathrm{N}-\mathrm{NO}_3^-$.
9. Las plantas deficientes en Mn, presentan una mayor sensibilidad a los daños por frío.
10. En las plantas deficientes en Mn, los carbohidratos solubles disminuyen, de forma particular en el sistema radicular.
11. Provee resitencia a las plantas frente a organismos patógenos. Contribuye a la síntesis de importantes metabolitos secundarios que participan en la producción de fenoles, glucósidos cianogénicos y lignina, componentes todos ellos con funciones defensivas (Burnell, 1988).
12. Participa, por medio de un papel importante, en la fijación de CO_2 en las plantas C_4.

Los síntomas por deficiencia de Mn, aparecen en primer lugar en las hojas en estadíos iniciales de desarrollo. En las fases iniciadles, los síntomas de deficiencia por Mn, son similares a aquellos provocados por la deficiencia de Fe. Aunque las carencias en Mn amenudo son asociadas a valores elevados de pH en el suelo, pueden derivar de la existencia de un desequilibrio nutricional con los nutrientes Ca, Mg e Fe. Elevadas concentraciones de Mn en los tejidos vegetales, pueden ocasionar sintomas de deficiencia a causa de una disminución en la absorción de otros nutrientes como Fe, Cu y Ca (Horst, 1988; Thompson y Huber, 2007).

1.3.10.3 Interacciones nutricionales

Fageria (2002), estudió las interacciones del Mn con otros nutrientes. Observó interacciones sinérgicas significativas con Mg y Zn; sin embargo, la absorción de Fe y Ca,disminuyó de forma significativa con la adición de Mn en el medio de cultivo. Maas et al. (1969) y Robson y Loneragan (1970), publicaron la existencia de interacciones antagónicas en Ca, Mg y Zn a causa de incrementos en la absorción de Mn. Foy (1984), publicó como un incremento de Ca en el medio de cultivo podía provocar una disminución en la absorción de Mn, aliviando de esta forma posibles problemas de toxicidad por Mn; asimismo, este autor publicó que la adición de P puede presentar efectos aliviadores en la toxicidad por Mn provocando que este último se sitúe en estado inactivo en los tejidos vegetales.

Chinnery y Harding (1980), han publicado efectos antagonistas del Mn sobre la absorción de Fe y viceversa. Esto, podría presentar aplicaciones de interés práctico en aquellos casos de posible toxicidad por Fe (suelos con condiciones reductoras) y Mn (suelos de naturaleza ácida), a través de aplicaciones con Mn o Fe en función del caso existente.

Las plantas deficientes en Zn acumulan concentraciones excesivas de Mn, lo cual indica interacciones de naturaleza antagónica entre estos dos nutrientes (Brady y Weil, 2002). Wilkinson et al. (2000), publicaron un efecto compensador a partir de la disponibilidad de N-mineral en la zona radicular, sobre posibles concentraciones excesivas de Mn en estado soluble. Foy (1984), publicó que la toxicidad por Mn soluble en medio de cultivo, es función de las interacciones entre el Mn y diversos nutrientes minerales, particularmente Fe y Si.

1.3.11 Boro

1.3.11.1 Boro en el sistema suelo-planta

Las principales entradas de B en el sistema suelo-planta, vienen dadas por la aplicación de fertilizantes químicos y enmiendas orgánicas, y a partir de los materiales parentales que constituyen el suelo. Las principales vías de salida del sistema son a través de la absorción por parte de las plantas, los procesos de adsorción por la fracción coloidal del suelo, los procesos de lixiviación y la inmovilización por parte de la población microbiana edáfica. Habitualmente, se reconocen tres fracciones de B en el suelo: soluble en agua, soluble en ácido y B total. La fracción extraible mediante agua hirviendo, es la reconocida como B biodisponible; la fracción soluble en ácido, incluye el B precipitado y el vinculado a la materia orgánica. El pH del suelo, la capacidad de intercambio catiónico, el contenido en arcilla y sesquióxidos, la naturaleza de las arcillas (superficie específica), el contenido de materia orgánica y la naturaleza salina del suelo, son propiedades edáficas que han sido identificadas como inluyentes en los procesos de solubilidad y sorción que afectan al B existente en los suelos (Elrashidi y O'Connor, 1982; Keren y Bingham, 1985; Yermiyahu et al., 2001). De las diferentes clases de arcillas, la ilita es la más interactiva con el B; por el contrario, la caolinita es la clase de arcilla que interacciona con menor intensidad con el B (Keren y Mezuman, 1981).

La adsorción del B es dependiente del pH existente en el suelo y de la concentración de B en la solución del suelo. Diversos investigadores, han publicado que los incrementos de pH acentúan la adsorción de B por las arcillas del suelo (Bingham et al., 1971; Sims y Bingham, 1967).

Keren et al. (1981), explicó que la respuesta de la adsorción del P frente a las variaciones de pH es la siguiente: en valores inferiores a pH 7, la forma predominante es $B(OH)_3$, pero puesto que la afinidad de las arcillas por esta especie es relativamente baja, la adsorción de la misma es mínima. A medida que el pH aumenta, la concentración de $B(OH)_4^-$ se incrementa de forma muy rápida. La cantidad de B adsorbido aumenta rápidamente a causa del incremento de afinidad por las arcillas. Incrementos supletorios del pH, provocan un aumento de la concentración de iones OH^- de forma relativa a $B(OH)_4^-$, de tal manera que la adsorción de B disminuye a causa de la competitividad ejercida por los iones OH^- en los puntos de adsorción. El B no experimenta procesos de oxidación-reducción, por ello la concentración de B no se ve afectada de forma apreciable cuando los suelos se ven sometidos a procesos de encharcamiento (Ponnamperuna, 1985). El B, presenta las peculiaridades de ser el único elemento nutritivo mineral no metálico y de encontrarse en forma no iónica en la solución del suelo.

El material parental del suelo, constituye la fuente principal de B en el suelo para las plantas; el mineral más común cuyo contenido en B es importante (sobre un 3%), es la turmalina, un complejo borosilicato (Goldberg, 1993). Los filosilicatos también contienen B, y posiblemente ejercen control sobre la actividad del B en la fase soluble. Las turmalinas son muy resistentes a los procesos de meteorización, mostrándose virtualmente insolubles, de tal forma que no pueden considerarse efectivos en actuaciones frente a situaciones de deficiencia por B (Goldberg, 1993).

1.3.11.2 Funciones en la planta

Las funciones más importantes del B en las plantas, han sido compiladas por Fageria y Gheyi (1999):

1. El B es esencial para la germinación de los granos de polen así como para el desarrollo del tubo polínico.
2. Participación en la síntesis de proteínas.
3. Ante carencias por B, la síntesis de citoquininas se muestra resentida.
4. Es un elemento de considerable importancia en la síntesis de los ácidos nucleicos.
5. Las plantas con un suministro inadecuado de B, acumulan $N-NO_3^-$ en raíces, tallos y hojas, mostrándose inhibida la reducción del $N-NO_3^-$ y la síntesis de aminoácidos.
6. Facilita la translocación de azúcares en las plantas.
7. Desempeña un papel significante en el transporte de nutrientes por las membranas vegetales.
8. Influencia el desarrollo y elongación celular.
9. Está involucrado en el metabolismo del N y el P.
10. Está intimamente asociado con las pectinas de la pared celular, de tal forma que las características físicas en el desarrollo de la pared celular se ven alteradas ante las carencias por B (Hu y Brown, 1994; Brown y Hu, 1997).

Gupta (1979), revisó el papel que el B desempeñaba en las especies vegetales, y concluyó, que el desarrollo radicular se veía reducido cuando el B se encontraba en concentraciones deficientes en le medio de cultivo.

El B no presenta movilidad en el interior de las plantas; por lo tanto, los síntomas de deficiencia por B aparecen en primer lugar en las hojas en estadíos juveniles y en las zonas de crecimiento (Fageria y Baligar, 2005). Las deficiencias por B afectan al desarrollo de las estructuras meristemáticas; como consecuencia de lo anterior, se provoca el estancamiento de estos puntos de crecimiento activo en tallos y sistema radicular, así como el fracaso en el desarrollo de las yemas, y, finalmente, el necrosamiento y muerte de todos estos tejidos (Fageria y Gheyi, 1999).

El rango existente en las plantas de cultivo entre los niveles de B considerados como óptimo y tóxico, es muy pequeño; por lo tanto, se deben de extremar las precauciones, en el momento de planificar correcciones ante deficiencias de B mediante la aplicación de fertilizantes químicos.

1.3.11.3 Interacciones nutricionales

Han sido halladas interacciones sinérgicas entre N y B, así como entre K y B (Moraghan y Mascagni, 1991; Fageria et al., 2002). Inal y Tarakcioglu (2001) y López-Lefebre et al. (2002), publicaron la existencia de efectos positivos del B sobre la absorción y el desarrollo de procesos metabólicos en el N. Eraslan et al. (2007), publicó que un incremento de los niveles de B en la planta, ocasionaban un incremento en las concentraciones de N en los tejidos vegetales. Concentraciones relativamente grandes de B en el medio de cultivo, han interferido en la absorción de Fe, Mn y Zn, pero por otra parte han incrementado la tasa de absorción de Cu (Fageria et al., 2002).

Las aplicaciones de Ca y Mg, pueden reducir la absorción de B por parte de las plantas. El efecto que presentan los nutrientes P y S sobre la absorción de B, no está claro (Gupta, 1993). Sin embargo, Gunes y Alpaslan (2000), han constatado toxicidades por B cuando el medio de cultivo se muestra deficiente en P, aliviándose las condiciones de toxicidad por B mediante aplicaciones de P. Las deficiencias por Zn, pueden acentuar la acumulación de B en las plantas (Graham et al., 1987); no obstante, la fertilización con Zn reduce la acumulación de B, lo cual se presenta como herramienta práctica en aquellos posibles casos de toxicidad por B (Graham et al., 1987; Moraghan y Mascagni, 1991; Swietlik,1995).

1.3.12 Aluminio

Los suelos sometidos a estudio en esta tesis doctoral, presentan naturaleza ácida; a consecuencia de lo anterior, y aunque en ninguno de los casos el pH en H_2O es inferior a 5 **(Anexo I)**, se tomó la decisión de someter a estudio las concentraciones de Al intercambiable presentes en los suelos objeto de estudio. Por todo ello, se incluye este elemento en la revisión bibliográfica introductoria de la presente tesis doctoral.

1.3.12.1 Aluminio en el sistema suelo planta

El aluminio presente en los suelos, forma parte de la estructura de minerales primarios y secundarios, especialmente aluminosilicatos como feldespatos, micas, caolinitas, esmectitas y vermiculitas (Allen y Hajek, 1989). A medida que los suelos sufren procesos erosivos (especialmente en zonas de elevada pluviometría y clima templado), el silicio es lavado, usualmente como $Si(OH)_4$ en solución, dejando al aluminio como formas sólidas de oxihidróxidos de aluminio, como la bohemita y la gibsita, como se muestra a continuación (Conyers, 1990):

$$Al_2Si_2O_5(OH)_4(\text{caolinita}) + 5H_2O \leftrightarrow 2Al(OH)_3\ (\text{gibsita}) + 2Si(OH)_4$$

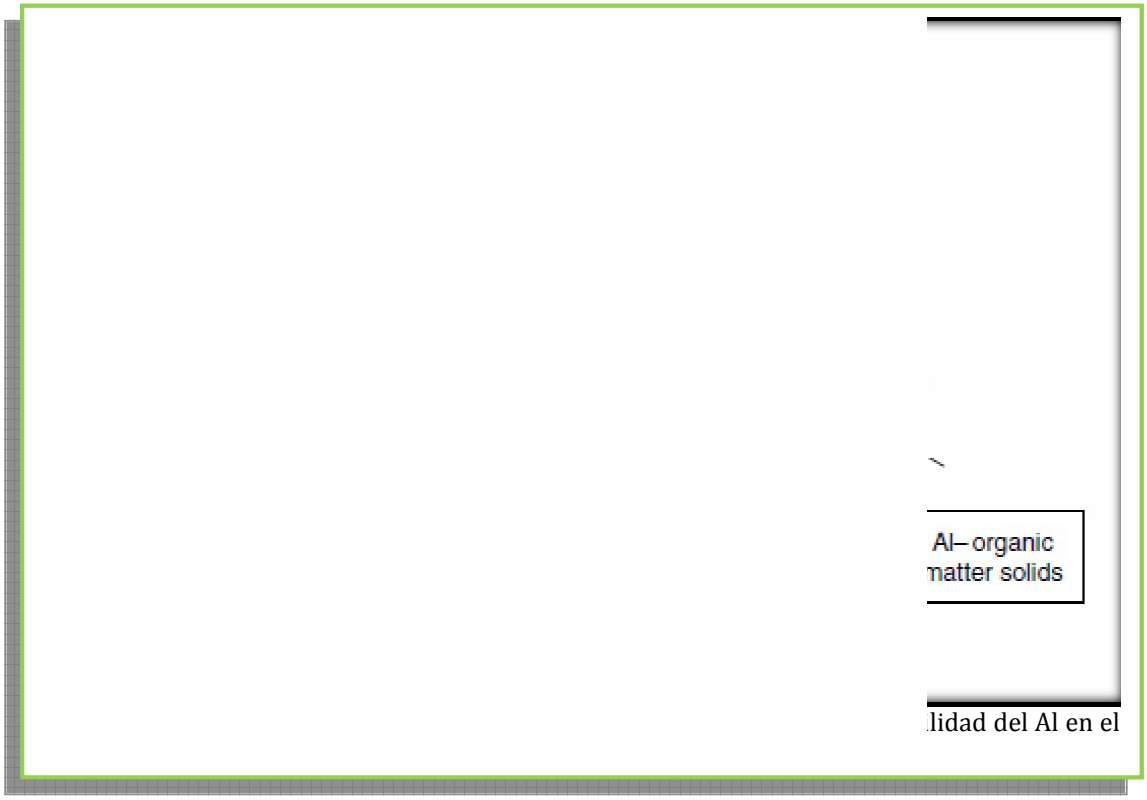
Los suelos comenzarán a ser más “viejos”, más ácidos y con más aluminio tóxico para el desarrollo vegetal, siendo clasificados como Oxisoles y Ultisoles, los cuales están localizados mayoritariamente, en los Trópicos y los Subtrópicos.

El motivo más común por el cual los suelos comienzan a sufrir procesos de acidificación, es la generación de iones H^+ como resultado de la reacción de los iones Al^{3+} con el agua del suelo. La ecuación para esta reacción en los suelos muy ácidos (pH<4.0), se describe a continuación:

Para ser biodisponible, el Al del suelo, debe de encontrase primero presente en la solución del suelo (Adams, 1984). La solubilidad del Al, no obstante, está controlada por diversos procesos (**Figura nº 6**). Por ejemplo, el Al contenido en los minerales del suelo, como la gibsita y la caolinita, puede disolverse bajo condiciones ácidas, liberando Al hacia la solución del suelo (Menzies, 1994).

Por otra parte, los minerales de arcilla con cargas negativas en su superficie, resultantes de sustituciones isomórficas (carga permanente) o de hidrólisis de grupos hidroxilo OH^- (carga variable), pueden tomar Al de la solución por atracción electrostática. Alófanos e imogolitas, que son aluminosilicatos amorfos con gran área superficial y elevada carga variable, pueden retener grandes cantidades de Al (Wada, 1989). La materia orgánica del suelo, también puede retener Al con intensidad, a través del proceso conocido como adsorción específica o complejación.

La concentración y actividad de los iones en el suelo, dependen de una serie de reacciones que tienen lugar en la solución acuosa del suelo. La magnitud de estas reacciones depende del (a) pH del suelo, (b) fuerza iónica, (c) naturaleza y concentración de los ligandos complejantes, y (d) naturaleza y concentración de los cationes competidores. Importantes entre estas reacciones son las siguientes: hidrólisis, polimerización, y complejación con aniones inorgánicos y orgánicos (**Tabla nº 5**).

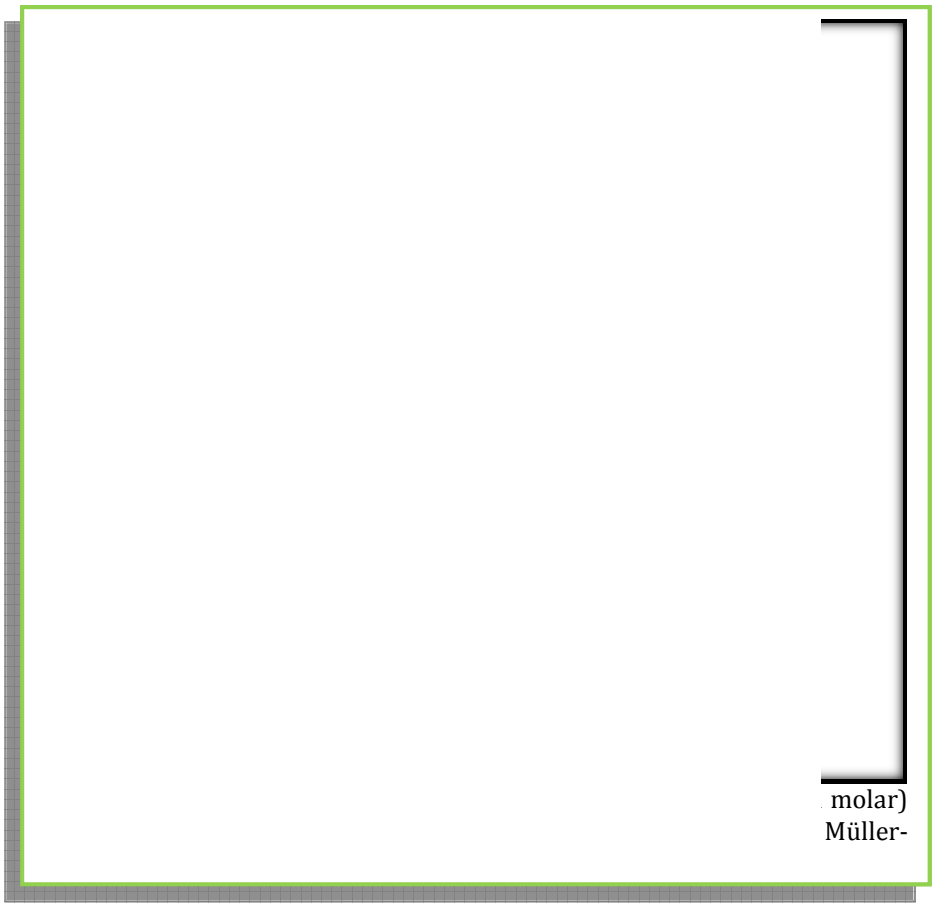


lidad del Al en el

Las especies de iones Al presentes en el suelo, varían con su pH (**Figura nº 7**). El incremento de la acidez del suelo, provoca una solubilización del Al, principal fuente de toxicidad en plantas cuando el pH del suelo < 5,5 (Bohn et al., 2001; Ernani et al., 2002; Kariuki et al., 2007). En condiciones de gran acidez (pH<4.5), el

se muestra con una mayor potencialidad de intercambio que las formas iónicas Al-hidroxilo que se presentan a pH más elevados (4.5 – 6.5) (Carson y Dixon, 1979).

Las especies iónicas de Al generan iones H^+ a través de una serie de reacciones de hidrólisis (Lindsay, 1979):



molar)
Müller-

El de cambio, precipita como especie Al-hidroxilo a medida que el pH aumenta, habiendo sido establecido que por cada unidad de pH de incremento, las formas solubles se reducen a una milésima parte (Lindsay, 1979). El ión predomina a pH<4.7; a pH 4.7-6.5; a pH 6.5-8; a pH>8.0 y aparece a valores de pH superiores a los usualmente encontrados en los suelos (Bohn *et al.*, 2001).

La intensificación del proceso de solubilización de las formas de Al presentes en el suelo, está íntimamente relacionada con el grado de acidificación causado por el proceso de lavado de los cationes básicos ( ) y con la disminución en el pH de la solución del suelo.

Los iones Al se translocan muy lentamente a la parte superior de las plantas (Ma *et al.*, 1997a). La mayoría de las especies vegetales, no contienen más de 0,2 mg $Al \cdot g^{-1}$ materia seca. No obstante, ciertas plantas que reciben la denominación de "acumuladoras de Al", pueden contener en torno a 2,0 mg$Al \cdot g^{-1}$ materia seca, sin sufrir ningún tipo de agravio.

EL IÓN Al^{3+} EN LA SOLUCIÓN DEL SUELO	
Reacciones de hidrólisis	$Al^{3+} + H_2O \leftrightarrows Al(OH)^{2+} + H^+$ $Al^{3+} + 2H_2O \leftrightarrows Al(OH)_2^{+} + 2H^+$ $Al^{3+} + 3H_2O \leftrightarrows Al(OH)_3 + 3H^+$ $Al^{3+} + 4H_2O \leftrightarrows Al(OH)_4^{-} + 4H^+$ $Al^{3+} + 5H_2O \leftrightarrows Al(OH)_5^{2-} + 5H^+$
Polimerización	$2Al^{3+} + 2OH^- \leftrightarrows Al_2(OH)_2^{4+}$ $13Al^{3+} + 28OH^- \leftrightarrows Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+} + 4H^+$
Complejación con aniones inorgánicos	$Al^{3+} + SO_4^{2-} \leftrightarrows Al(SO4)^+$ $Al^{3+} + F^- \leftrightarrows AlF^{2+}$
Complejación con aniones orgánicos	$Al^{3+} + Oxalato^{2-} \leftrightarrows (Al\text{-}Oxalato)^+$ $Al^{3+} + Citrato^{3-} \leftrightarrows (Al\text{-}Citrato)^0$ $Al^{3+} + Fulvato^{n-} \leftrightarrows (Al\text{-}Fulvato)^{(n-3)-}$

Tabla nº 5: Posibles reacciones del ión Al^{3+} en la solución del suelo. Fuente: Nordstrom y May, (1996)

Para comprender la toxicidad que presenta el aluminio sobre los vegetales, es necesario revelar su localización, tanto a nivel de tejido como a nivel celular, lo cual, constituye una de las mayores controversias y dificultades encontradas en la mayoría de las investigaciones llevadas a cabo sobre este tema. Existen numerosos lugares de acción potenciales del aluminio, cuya identificación ayudaría a la selección de genotipos con mayor resistencia a este metal.

La toxicidad por Al se manifiesta, principalmente, a través de malformaciones y anomalías en el funcionamiento, del sistema radicular; una sintomatología, que se ve agravada por los bajos niveles de Ca en los suelos ácidos (Hechtbuchholz y Foy, 1981).

Como la inhibición de la elongación de la raíz es uno de los primeros síntomas visibles en la planta tras la aplicación externa de aluminio, éste órgano, es uno de los más estudiados a la hora de analizar la distribución y efectos del aluminio (Llugany et al 1995). La mayoría de estudios indican que la concentración de aluminio en la raíz, depende de la diferente sensibilidad de las plantas al aluminio y que la disminución del crecimiento, se relaciona con el contenido de éste en la raíz, ya que muchas plantas más tolerantes poseen mecanismos de exclusión del metal (Yamamoto *et. al*. 1994).

En general, se acepta que el aluminio se acumula en los ápices de las raíces, incluyendo la caliptra y las zonas meristemáticas y de elongación, como han mostrado estudios realizados por diversos autores (Delhaize *et al.* 1993, Sasaki *et al.* 1997), en diferentes variedades de trigo. A partir de estos estudios, se ha

observado una característica acumulación de aluminio en la epidermis y en las células externas del córtex.

La inhibición en el desarrollo del sistema aéreo y el sistema radicular, se constituyen como los síntomas visibles de la toxicidad por Al (mostrándose de una forma más temprana en el sistema radicular).

En plantas expuestas a elevados niveles de Al, la elongación de su eje principal se ve inhibida, comenzando en las raíces un proceso de engrosamiento y amarronamiento, mostrándose más quebradizas y ocasionalmente necróticas (Foy, 1984).

El Al, aparentemente, no interfiere directamente en la germinación de las semillas, pero de forma indirecta, deteriora el desarrollo de nuevas raíces y por ende, el desarrollo de las nuevas plántulas (Nosko *et al.,* citados por Mossor-Pietraszewska, 2001).

Las respuestas comunes que se presentan en la zona aérea frente a la toxicidad por Al son: modificaciones celulares y estructurales en las hojas, incrementos en los índices de resistencia a la difusión, reducción en la apertura de estomas, disminución de la actividad fotosintética induciendo a su vez procesos de clorosis y necrosis foliares, reducción en número y tamaño de las hojas y disminución de la biomasa correspondiente en la parte aérea (Thornton *et al.*, citados por Mossor-Pietraszewska, 2001).

El Al aparentemente interactúa de forma directa y/o indirecta con los factores que influencian la organización del citoesqueleto, como los niveles citosólicos de Ca^{2+} (Jones et al., citados por Mossor-Pietraszewska, 2001), Mg^{2+} y calmodulina (Grabski et al., citados por Mossor-Pietraszewska, 2001), potencial eléctrico de superficie celular (Takabatake y Shimmen, citados por Mossor-Pietraszewska, 2001), formación de calosa (Horst *et al.*, citados por Mossor-Pietraszewska, 2001) y composición lipídica de la membrana plasmática (Zhang *et al.*, citados por Mossor-Pietraszewska, 2001).

Asimismo, Roy *et al.*, Taylor, Kochian, Cocker *et al.*, Matsumoto y Osawa y Matsumoto (todos ellos citados por Mossor-Pietraszewska, 2001), han indicado que el Al interfiere en los siguientes aspectos del desarrollo vegetal: división celular en los ápices radiculares y en las raíces laterales, incremento de la rigidez de las paredes celulares mediante la reticulación de pectinas, reducción de la replicación del DNA por incremento de la rigidez de la doble hélice, disminución de los procesos de respiración en los tejidos radiculares, obstrucción en la funcionalidad de una serie de enzimas, disminución en el contenido de polisacáridos estructurales de las paredes celulares, disminución en la producción y transferencia de citoquininas, modificaciones estructurales y funcionales de la membrana plasmática, reducción en la capacidad de absorción de H_2O, e interferencias con la absorción, transporte y metabolismo de diversos nutrientes esenciales.

La calosa, es un polisacárido consistente en cadenas de 1,3-β-glucano, que se genera de manera natural en las células en determinados estadíos de su desarrollo o como respuesta a lesiones sufridas (Buchanan et al, 2000). Un síntoma

temprano en la toxicidad por aluminio, es la formación de calosa en el sistema radicular. Según Horst *et al.* (1997), la formación de calosa es un marcador sensible de la sensibilidad genotípica frente a la toxicidad por Al. La calosa puede causar el bloqueo en el transporte de nutrientes minerales en el sistema radicular, a través del bloqueo de los plasmodesmos (Sivaguru *et al.*, 2000).

Las respuestas del sistema radicular y en general, de toda la planta, frente a la toxicidad por aluminio, varían considerablemente dependiendo de la especie e incluso dependiendo de la variedad que estemos estudiando (Barceló y Poschenrieder, 2002).

Las respuestas de las plantas frente a cualquier estrés se dividen en estrategias con el fin de evitarlo y estrategias de tolerancia, lo cual es aplicable también al estrés por aluminio.

Entre los mecanismos que pretenden evitarlo se encuentran:

- Exclusión de moléculas de bajo peso molecular para la quelación del aluminio apoplástico.
- Modificación del pH rizosférico.
- Unión del aluminio a la pared celular.
- Disminución de la permeabilidad de la membrana a la penetración de aluminio.
- Unión del aluminio al mucílago asociado al ápice de la raíz.

Entre los mecanismos de tolerancia:

- Quelación del aluminio con moléculas orgánicas en el interior celular.
- Unión del aluminio a proteínas en el citoplasma.
- Compartimentación celular del aluminio.

Hasta el momento, no existen estudios que apoyen la mayoría de estos mecanismos, de tal forma que han sido, principalmente, especulados.

Debido a que la inhibición del crecimiento radicular es uno de los primeros efectos observados en la toxicidad por aluminio, este factor se viene usando ampliamente como indicador de la tolerancia al aluminio (Howeler y Cadavid, 1976; Baligar et al., 1990), aunque los mecanismos mediante los cuales sucede esto, no son todavía bien conocidos. Otro factor que también se tiene en cuenta, es la acumulación de callosa, que es directamente proporcional a la cantidad de aluminio (Zhang *et al*., 1994; Massot *et al*., 1999).

1.3.12.2 Interacciones nutricionales

La mutua interacción entre los iones metálicos, es de gran importancia para el desarrollo vegetal, y determinan la disponibilidad de los iones metálicos atendiendo a las diferentes condiciones reinantes en el suelo, como el pH y el potencial redox. La toxicidad por Al es un proceso complejo que se manifiesta a través de deficiencias en P, Ca, Mg y Fe (Foy, citado por Mossor-Pietraszewska, 2001). La solubilidad del Al se puede ver incrementada o disminuida en función de la presencia de otros elementos en el sistema suelo-planta.

La toxicidad por aluminio, normalmente disminuye la concentración de ciertos elementos minerales en las plantas. La disminución de la absorción catiónica puede ser correlacionada con la inhibición del crecimiento radicular, ya que, sobre todo, cationes como el K^+, cuya acumulación contribuye a la expansión celular, ven afectada su absorción en presencia de Al. Así, parece ser que mientras los contenidos de N, K, Mg, Fe y Mn permanecen casi inalterados, el contenido en P y Ca se ve muy afectado en los tratamientos con aluminio.

Estudios con plantas hiperacumuladoras de aluminio, revelan que la acumulación de aluminio en las hojas restringe la acumulación de otros elementos minerales en las hojas, lo cual sugiere que aquellas plantas que acumulan aluminio, han desarrollado mecanismos eficientes para usar bajas concentraciones de otros elementos esenciales para crecer en suelos ácidos (Osaki et al., 1998). No solo la absorción de calcio parece ser que es alterada, sino también su translocación en el interior de la planta (Huang *et al*., 1992).

Las interacciones entre el Al y el Ca afectan, de forma importante, los procesos de absorción del Ca y su transporte en aquellas plantas que se desarrollan en suelos cuyo pH es inferior a 5.5. El incremento en los niveles de Al, provocó que la concentración de Ca en los tallos y raíces de trigo, se viera drásticamente reducida (Jones *et al.*, citados por Mossor-Pietraszewska, 2001). Hay una amplia información indicativa de cómo la acumulación de Ca y Mg en las plantas se ve disminuda por el Al, de forma mucho más significativa, que por la interacción con cualquier otro nutriente mineral (Rengel y Robinson, citados por Mossor-Pietraszewska, 2001). Posiblemente, lo anterior sea debido a una alteración inducida por el Al en las propiedades estructurales en la bicapa lipídica de la membrana plasmática. Así, la inhibición en el transporte de Ca^{2+} inducida por el Al, puede verse involucrada en las fases iniciales de la toxicidad por Al.

Uno de los primeros síntomas definidos en la toxicidad por aluminio, es el producido debido a procesos, tanto en el citoplasma como en la membrana plasmática, por los cuales el metal bloquea la entrada de calcio.

Es bien conocido el efecto antagonista del calcio en la toxicidad por aluminio. Una elevada cantidad de Ca evita la entrada de éste en la raíz y la inhibición del desarrollo radicular (Matsumoto et al., 1999).

La controversia acerca de si el aluminio aumenta o disminuye la concentración de calcio intracelular, se refleja en la disparidad de los estudios realizados y sus resultados, indicando algunos una disminución de éste a través del bloqueo de los canales (Rengel, 1992) y otros un aumento de la concentración citosólica del catión (Ma, Rengel y Quo, 2002).

En cuanto a la absorción de K, Lance y Pearson (1969) observaron que disminuía la absorción de este elemento en plantas de algodón ante la presencia de Al, lo cual ha sido corroborado por investigaciones llevadas a cabo en arroz por Foy, Chaney y White (1978). Sin embargo, experimentos realizados por Lee y Pritchard en 1984, demuestran el efecto contrario. En estudios realizados en *Zea mays* por Cumming y Ecbert (1986), se encuentra más afectado el transporte de K que su absorción.

Estudios más recientes (Liu y Luan, 2001) siguen apuntando la inhibición en la absorción de K por parte del Al en células guarda de *Arabidopsis*, a través de un bloqueo interno. Sin embargo, Malkanthi, Moritsugu y Yokoyama (1985), en cultivos de cebada, demostraron que se produce una estimulación en la absorción de potasio en las raíces al ser tratadas las plantas con aluminio.

La forma en la que el fósforo se encuentra en el suelo, es función del pH existente en el mismo; así, cuando las condiciones son ácidas, se encuentra, mayoritariamente, en forma $H_2PO_4^-$.

En suelos ácidos, se produce la precipitación de fosfatos de aluminio, altamente insolubles, lo que conduce a concentraciones muy bajas de fosfato en el suelo; por otra parte, la presencia en el suelo de los hidróxidos de aluminio, favorece la retención del fósforo en su superficie, disminuyendo su disponibilidad. También, se debe de tener en cuenta que, concentraciones elevadas de Al en la disolución del suelo conllevan una disminución en el desarrollo radicular, lo que supone una menor capacidad de la planta para la absorción de nutrientes.

Uno de los síntomas observados en las plantas expuestas a tratamientos con aluminio, es una pigmentación más oscura, un verde más intenso que Lee y Pritchard (1984), relacionaron con una deficiencia de fósforo. En general, en el rango de pH comprendido entre 4.5 y 7, se observa una fuerte interacción entre Al y P, incrementándose de esta forma los niveles de fósforo inmovilizado en la raíz y disminuyendo el fósforo disponible en la parte aérea, donde se aprecian los síntomas por deficiencia de P. El aluminio concentra la cantidad de fósforo en la raíz y lo disminuye en la parte aérea (Cuming y Ecbert, 1986).

El Al incrementa de forma marcada el potencial redox de los tejidos radiculares, disminuye la cantidad de enlaces de alta energía con el P e incrementa los contenidos de P mineral en las raíces (Slaski *et al.*, citados por Mossor-Pietraszewska, 2001). El Al ligado a los ácidos orgánicos previene de la formación de complejos P-Al, lo cual resulta en un incremento en la disponibilidad del P en las células radiculares.

Otsuka (1969), observó como el tratamiento de las raíces de las plantas con aluminio, provoca una disminución en la concentración de hierro y produce síntomas típicos de clorosis.

Como ya ha sido mencionado anteriormente, la absorción de hierro se caracteriza por estar constituida por dos estrategias (I y II). La estrategia I, característica de la mayoría de las dicotiledóneas y no gramíneas, y la estrategia II, típica tan solo de gramíneas. Esta última, requiere la exudación de fitosideróforos. Con respecto a esto último, Chang, Ma y Matsumoto (1998), observaron que la biosíntesis de éstos y la exudación de los mismos, podían ser inhibidas por tratamientos con aluminio en plantas de trigo. Sin embargo, la solubilizacion del hierro y su absorción por parte de las plantas, no se veía alterada. Además, esta inhibición se producía a altas concentraciones de aluminio (20 µM) y después de haber transcurrido 24 horas desde el tratamiento, de manera que no parece que sea el aluminio el que directamente bloquee el transporte de hierro al interior celular y sea más una consecuencia secundaria de los efectos producidos por éste.

Las concentraciones de Al y Mn soluble alcanzan frecuentemente niveles fitotóxicos en suelos ácidos. Taylor *et al.* (citados por Mossor-Pietraszewska, 2001), han examinado el efecto de las combinaciones de Al y Mn en el desarrollo de *Vigna unguiculata* (Caupí), así como en su patrón de acumulación de metales. Bajas concentraciones de Al en solución nutritiva (1 a 8 µM) mostraron poco efecto sobre la acumulación de Mn en raíces y tallos, mientras que mayores concentraciones (hasta 100 µM) disminuyeron la acumulación de Mn en los tallos. De forma similar, bajas concentraciones de Mn (0.1 a 6 µM) presentaron poco efecto sobre la acumulación de Al, mientras que mayores concentraciones (hasta 50 µM) incrementaron la acumulación de Al tanto en tallos como en raíces.

Los síntomas de deficiencia de B y toxicidad por Al guardan similitud, encontrándose asociados con perturbaciones en las funciones de las membranas de los tejidos radiculares (Lukaszewski y Blevins, citados por Mossor-Pietraszewska, 2001). LeNoble *et al.* (citados por Mossor-Pietraszewska, 2001), notificaron como la incorporación de B protegió frente a la inhibición del desarrollo radicular.

El silicio (Si) puede aliviar la toxicidad por Al en determinadas especies vegetales y bajo ciertas condiciones del entorno. La explicación a este mecanismo de desintoxicación por el Si presenta ciertas controversias: a través de un incremento en el pH inducido por el Si, reduciendo la biodisponibilidad del Al, o bien por medio de mecanismos internos de desintoxicación en la planta (Cocker *et al.*, citados por Mossor-Pietraszewska, 2001).

1.4 ESPECIES Y VARIEDADES DE VID

1.4.1 El género *Vitis*

El género *Vitis,* tradicionalmente ha sido dividido en dos subgéneros o secciones; *Vitis (Euvitis)* y *Muscadinia.* El subgénero *Vitis* es el más grande de los dos, de tal forma que comprende todas las especies del género *Vitis,* a excepción de *V. rotundifolia* y *V. popenei.*

Los miembros de ambos subgéneros, se diferencian en aspectos morfológicos (**Figura nº 8**) y genéticos (las especies del subgénero *Vitis,* poseen 38 cromosomas, mientras que las especies del subgénero *Muscadinia,* poseen 40 cromosomas).

1.4.2 La especie *Vitis vinifera* L.

Cuando y donde el género *Vitis* evolucionó, no está demasiado claro. La amplia distribución actual de las especies de este subgénero (América, Asia y Europa), contrasta con la restricción a la que se encuentran sometidas las especies del subgénero *Muscadinia.* Más allá de su origen geográfico, el actual rango de distribución del subgénero *Vitis*, parece ser que se estableció al final del último período de glaciación (~ 8.000 a.C.).

Los principales hábitats en los cuales se estableció la especie *V. vinífera* subespecie *sylvestris* (silvestre), fueron los bosques húmedos al sur de los mares Caspio y Negro, en los márgenes más fríos de los bosques del Mediterráneo norte, y

en el interior de Europa a lo largo de los ríos Danubio, Rhin y Ródano. Estos refugios durante el período de glaciación, parecen responder a la cuestión del origen Europeo de *Vitis vinífera.* A partir de la domesticación de esta especie silvestre, surge la especie cultivada con un mayor rango comercial, *Vitis vinífera* subespecie *sativa* (cultivada), a partir de la cual han surgido múltiples variedades de empleo agronómico.

Sin embargo, algunas especies americanas han jugado un papel muy importante en el desarrollo del cultivo de *Vitis vinífera* L., ya que gracias a estas, se han podido obtener portainjertos más resistentes al frío, a determinadas condiciones del medio edáfico, a la filoxera (causada por el insecto *Dactylasphaera vitifolia*) o a diferentes enfermedades de origen fúngico.

A diferencia de otras especies vegetales, el proceso de domesticación en la vid, tiene lugar con relativa sencillez.

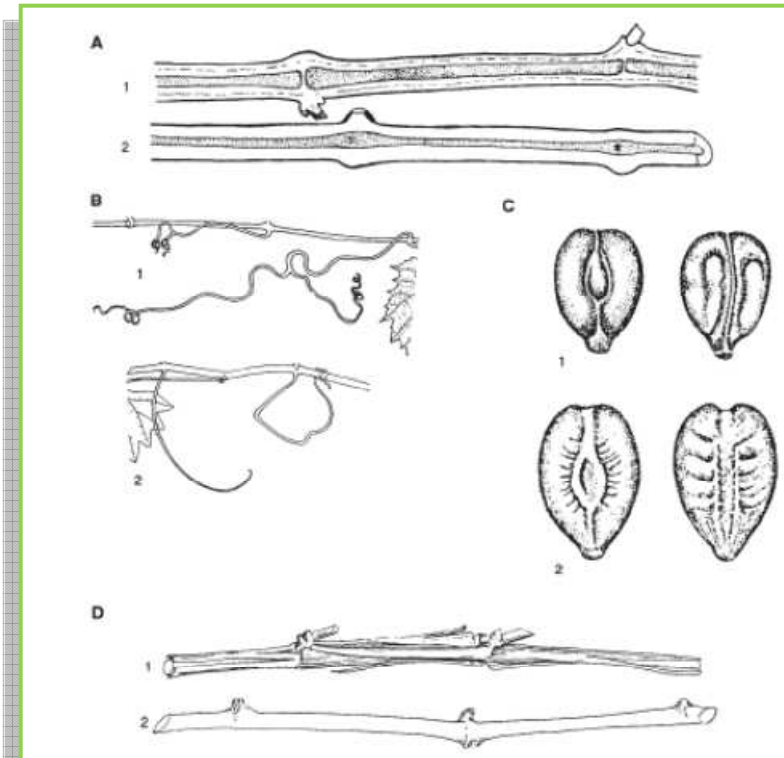


Figura nº 8: Propiedades morfológicas de los subgéneros *Vitis* (1) y*Muscadinia* (2). (A) morfología interna del sarmiento; (B) zarcillos; (C) morfología de la semilla; (D) desfibrado de la corteza. Fuente: Jackson, R. S (2008).

Lo anterior es debido a diversas características, entre las cuales se pueden citar sus mínimos requerimientos de minerales y de agua; además, poseen una gran capacidad de propagación y pueden ser sometidas a procesos de poda, para disminuir su capacidad trepadora y favorecer el monocultivo (Jackson, 2008). El hecho más significativo en el proceso de domesticación, ha tenido lugar en las características reproductivas, ya que las especies silvestres son unisexuales, produciéndose el paso hacía la aparición de flores hermafroditas (Carbonneau, 1983).

Cuanto mayor antigüedad presenta la domesticación de un cultivar, mayores son los rasgos de ese proceso de domesticación, es decir, con más rotundidad se muestran los rasgos de un proceso de selección (bayas más grandes y con un mayor contenido de pulpa, y raspones .de un mayor tamaño (**Figura nº 9**)).

1.5 EL CULTIVAR PRIETO PICUDO

El termino cultivar, difiere del término variedad, en que este último se refiere a una población de plantas cuyas características inequívocas han surgido a través de un proceso natural.

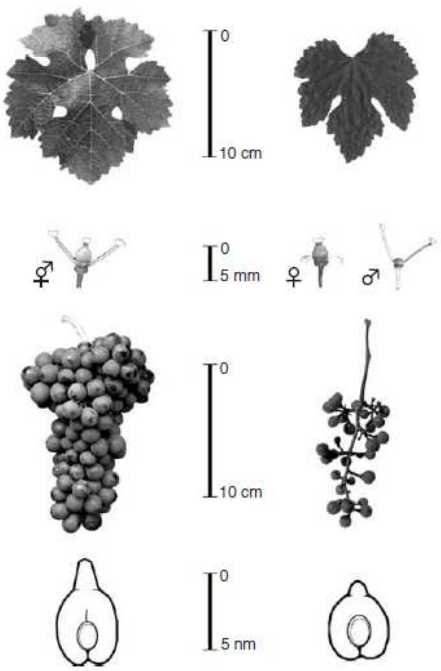


Figura nº 9: Diferencias morfológicas en las subespecies *sativa* (izquierda) y *sylvestris* (derecha) entre hojas, flores, racimos y semillas. Fuente: Jackson, R. S (2008).

Por lo tanto, en el término cultivar, se evoca la mano del hombre y la existencia de un proceso de selección. Así, las vides cultivadas con apariencia vegetativa y reproductiva suficientemente similar, son denominadas de forma habitual por los viticultores con el término "variedad", mientras que los botánicos se referirán a ellas como "cultivar". De acuerdo con el Código Internacional de Nomenclatura para Plantas Cultivadas (International Society for Horticultural Science, 2004), un cultivar es una colección de plantas que han sido seleccionadas por un atributo o una combinación de atributos particular, siendo claramente unívoca, uniforme y estable en sus características, de tal forma que en su propagación, tales características se mantienen (en este aspecto de la propagación, únicamente si esta se realiza por métodos asexuales, mantendremos las mismas características en las vides descendientes de aquella que deseemos propagar).

En el caso del cultivar Prieto Picudo, que es el que presenta un mayor interés para nosotros, su clasificación botánica, a modo de esquema jerárquico, se muestra en la **figura nº 10**.

El cultivar objeto de la realización de esta tesis, “Prieto Picudo”, es reconocido por la Denominación de Origen “Tierra de León” como cultivar principal de uva tinta junto con el cultivar “Mencía”, aunque es el primero de los mismos quien otorga un mayor carácter a la D.O.; para ambos cultivares, el reglamento de la citada D.O. establece un rendimiento máximo de 6.000 y 8.000 kg/ha en viñedos con formación en vaso y espaldera respectivamente, y una graduación alcohólica volumétrica mínima en el momento de la vendimia de 11,5% Vol.

En la descripción de los cultivares de vid, el método científicamente aceptado, utilizado hasta hace algunos años de forma exclusiva, ha sido la ampelografía, basada en la descripción de diferentes caracteres morfológicos de la planta. Con el fin de reducir la posible subjetividad de algunos caracteres morfológicos, se han incluido una serie de caracteres cuantitativos morfométricos que complementen a la disciplina ampelográfica.

En la actualidad, la identificación de los cultivares de vid ha ampliado sus posibilidades con el avance de las técnicas de biología molecular, de tal forma que la combinación del empleo de estas técnicas junto con la descripción ampelográfica, permiten la realización de una identificación más rigurosa.

El cultivar “Prieto Picudo”, objeto de estudio en esta tesis, es descrito ampelográficamente en la **tabla nº 6**.

1.6 ASPECTOS NUTRICIONALES EN *Vitis vinifera* L.

Cada una de las células de los tejidos de una planta de vid en desarrollo, presenta una serie de requerimientos, entre los cuales se encuentran un conjunto, relativamente bien definido, de nutrientes minerales inorgánicos, además de agua y carbono. Algunos de estos nutrientes, especialmente durante el desborre y la caída de hojas, son suministrados desde las reservas acumuladas en las estructuras permanentes de la vid o en sus senescentes hojas.

No obstante, la mayoría de los nutrientes minerales, a lo largo del período de crecimiento activo anual, son obtenidos por las raíces en forma de iones disueltos en la solución del suelo. Las raíces de la vid, pueden desarrollarse buscando zonas del suelo ricas en elementos nutritivos minerales, proceso que recibe el nombre de intercepción radicular, o bien pueden permanecer a la espera de que los nutrientes se aproximen a ellas a través de la solución del suelo (en este último caso, los nutrientes pueden desplazarse a través del medio edáfico, bien por el proceso de difusión, el cual acostumbra a ser el proceso dominante, o bien por medio del flujo de masas, el cual es posible cuando las vides transpiran de forma intensa, extrayendo de esta manera grandes cantidades de agua del suelo. De hecho, una de las ventajas adaptativas que ha proporcionado la transpiración, es la capacidad para incrementar el flujo másico de nutrientes hacia la superficie radicular, lo cual puede ser importante en suelos con escasa disponibilidad de nutrientes, no constituyendo el agua un factor limitante (Cramer *et al.*, 2008). En conformidad con lo expuesto anteriormente, las vides parece ser que transpiran de una forma más intensa cuando la concentración de nutrientes en la solución del suelo es baja, marchitándose con más facilidad, las hojas de las vides que se desarrollan en zonas

de elevada fertilidad química, ante la aparición del factor limitante hídrico (Keller y Koblet, 1994).

nº 10: Esquema de clasificación de *Vitis vinífera* el nivel de cultivar Prieto Picudo.

La disponibilidad de nutrientes para el sistema radicular disminuye abruptamente a medida que el suelo se seca (Bloom et al., 1985; Jackson et al., 2008) aunque este hecho provoca una disminución en la absorción de nutrientes y en su reparto hacia el sistema aéreo (Davies et al., 2002; Mpelasoka et al., 2003), la concentración de nutrientes en los tejidos puede, no obstante, verse incrementada, ya que el estrés hídrico inhibe la asimilación del carbono y el desarrollo del sistema aéreo (Bloom et al., 1985). A pesar de todo, tanto la concentración como la cantidad de nitrógeno total en hojas y tallos, tiende a ser menor en vides cuyo crecimiento se ha visto ralentizado por la competencia con cubierta vegetales, por el acceso tanto al agua como a los nutrientes (Celette et al., 2009; Tesic et al., 2007).

Órgano de la planta	Carácter	Código OIV	Descripción Prieto Picudo
Sumidad	Distribución pigmentación antociánica de la sumidad	002	No ribeteada
	Intensidad de la pigmentación antociánica de la sumidad	003	Media
	Densidad de los pelos tumbados de la extremidad	004	Muy alta
Pámpano joven	Color de la cara dorsal de los entrenudos	007	Rojo
	Color de la cara ventral de los entrenudos	008	Rojo
	Longitud de los zarcillos	017	Cortos
Hoja adulta	Tamaño de la hoja adulta	065	Mediana
	Forma del limbo de la hoja adulta	067	Pentagonal
	Nº de lóbulos de la hoja adulta	068	Cinco
	Pigmentación antociánica de los nervios principales del haz	070	Débil
	Perfil de la hoja adulta	074	En canal
	Forma de los dientes de la hoja adulta	076	Un lado cóncavo y otro convexo
	Forma del seno peciolar de la hoja adulta	079	Abierto
	Forma de la base del seno peciolar	080	En uve
	Particularidades del seno peciolar	081	Ninguna
	Forma de los senos laterales superiores	082	Con lóbulos muy superpuestos
	Densidad de pelos tumbados entre nervios en el envés	084	Media
	Densidad de pelos tumbados de los nervios principales	086	Media
Sarmiento	Sección transversal del sarmiento	101	Circular
	Color general del sarmiento	103	Marrón amarillento
Racimo	Tamaño del racimo	202	Muy corto
	Compacidad del racimo	204	Compacto
	Longitud del pedúnculo del racimo	206	Corto
	Forma del racimo	208	Cilíndrico
Baya	Forma de la baya	223	Elíptica
	Color de la epidermis de la baya	225	Azul – negra
	Sabores particulares de la baya	236	Ninguno
	Clasificación del sabor de la baya	237	Ligeramente aromático
	Peso de 100 semillas (g)	243	Medio

Tabla nº 6: Principales caracteres morfológicos de la descripción ampelográfica del cultivar Prieto Picudo. Fuente: Rubio et al. (2003)

La disponibilidad de nitrógeno en el medio edáfico fluctúa ampliamente a lo largo del período de crecimiento activo de la vid, mientras que la disponibilidad de los relativamente móviles calcio (Ca) y magnesio (Mg), mientras que los apenas móviles fósforo (P) y potasio (K), es mucho más constante (Nord y Lynch, 2009). El potasio (K^+) y el fósforo ($H_2PO_4^-$) pueden ser tomados a través de las porciones radiculares maduras, mientras que la absorción de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), parece ser que se ve restringida a las raicillas finas no lignificadas. La absorción del hierro (Fe^{2+}) se ve confinada a la zona de crecimiento radicular distal, mientras que la absorción de sulfatos (SO_4^{2-}) se concentra en la zona de elongación radicular situada inmediatamente detrás de la región meristemática. De forma adicional, las regiones maduras radiculares de la vid, desarrollan de forma usual asociaciones simbióticas con micorrizas (Possingham y Groot Obbink, 1971). El hongo puede absorber agua y nutrientes a una distancia considerable de la ocupada por el sistema radicular de la vid, por lo que se extiende de forma considerable el volumen de suelo explorado por la planta, de tal forma que se incrementa la capacidad de absorción radicular. el hongo transfiere la mayor parte de los nutrientes absorbidos al sistema radicular de la planta, recibiendo a cambio azúcares, principalmente glucosa, que constituye la fuente de energía para el desarrollo del micelio, la producción de esporas y la absorción activa de nutrientes. Estos microorganismos simbióticos son principalmente conocidos por su capacidad para incrementar la

capacidad de absorción de fósforo ($H_2PO_4^-$) y zinc (Zn^{2+}), pero también transfieren azufre (S) y cobre (Cu^{2+}) (Marschner, 1995; Smith et al., 2001). Estos microorganismos, también facilitan la adquisición de N, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} y Fe^{2+} bajo ciertas condiciones. No obstante, los requerimientos de carbono, convierten a las micorrizas como sumideros de los asimilados fotosintéticos (Hall y Williams, 2000; Smith et al., 2001). El suministro de carbono a los hongos, constituye el precio a pagar por la vid como consecuencia del incremento de la capacidad de absorción de nutrientes. Una vez que la simbiosis se establece, el hongo disminuye de forma ostensible el desarrollo radicular lateral, transfiriendo a la planta una mayor dependencia de los suministros de nutrientes por parte de la micorriza (Osmont et al., 2007). Como consecuencia de este coste de carbono, las plantas de vid jóvenes que mantienen una relación simbiótica con micorrizas, se desarrollan de una forma más lenta en los suelos "contaminados" por micorrizas.

El desarrollo de la planta de vid, constituye el "marcapasos" de la absorción de nutrientes, de tal forma que las tasas de absorción de nutrientes y el desarrollo del sistema radicular reflejan la demanda generada por el desarrollo de la planta (Clarkson, 1985; Clarkson y Hanson, 1980; Gastal y Lemaire, 2002; Tester y Leigh, 2001). El reciclado de nutrientes en el floema entregados desde el xilema, o sus versiones asimiladas desde las hojas hacia el sistema radicular, actúa como una señal de retroalimentación en el sistema encargado de regular la absorción de nutrientes (Keller, 2010). Más aún, el estatus de la planta en carbono influencia la absorción de nutrientes, de forma al menos parcial como consecuencia de los requerimientos energéticos para el funcionamiento de las bombas de ATP. Bajo condiciones de drástica reducción en el suministro de carbono - por ejemplo, ante una limitación en la fotosíntesis por causas ambientales – la vid reduce la absorción de nutrientes y su transporte en el xilema (Keller et al., 1995). La disminución en el desarrollo de la vid debido a estrés hídrico, también provoca una disminución de los requerimientos nutricionales de la planta.

No obstante, la absorción de nutrientes puede exceder a los requerimientos, cuando la abundancia de nutrientes en el medio edáfico es manifiesta y no se presentan limitaciones en el medio para su absorción. Este "consumo de lujo", puede ser útil para una acumulación temporal de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, los cuales se encuentran sujetos a amplias fluctuaciones en el medio edáfico (Clarkson, 1985). La acumulación de nutrientes, en el interior de las células, tiene lugar en las vacuolas, mientras que el citoplasma dispone de una buena capacidad de neutralización frente a fluctuaciones en la concentración de nutrientes (Forde, 2002; Tester y Leigh, 2001). Como consecuencia de lo anterior, la concentración de nutrientes en el citoplasma puede ser de una magnitud tres o cuatro veces inferior a la existente, tanto en la vacuola, como en el apoplasto. Estos pools de almacenamiento, efectúan un servicio de cobertura frente a temporales desabastecimientos de nutrientes (Bloom et al., 1985). No obstante, aun cuando la disponibilidad de los nutrientes se incremente al unísono, no es necesario que todos los nutrientes sean absorbidos y almacenados en la igual medida (Delas y Pouguet, 1984).

Cuando en las vacuolas celulares se alcanza unas concentraciones críticas mínimas de nutrientes, la concentración en el citoplasma no puede ser sostenida y el metabolismo celular es perturbado. Así por ejemplo, la expansión de el limbo foliar,

es particularmente sensible a las fluctuaciones en el suministro de nitrógeno (Forde, 2002). Las deficiencias nutricionales detonan un amplio rango de respuestas en la vid, algunas de las cuales son genéricas frente a una situación de estrés, mientras que otras son específicas para el nutriente en cuestión (Grossman y Takahashi, 2001). Entre las respuestas genéricas, encontramos el cese de la división y la expansión celular, la acumulación de almidón, la disminución de la actividad fotosintética y la existencia de una serie de modificaciones en el metabolismo que tienen por objeto adaptarse al suministro limitado de nutrientes. La acumulación de especies reactivas de oxígeno, también se manifiesta como una respuesta genérica, la cual es común, al menos, ante las deficiencias de N, K, P y S (Schachtman y Shin, 2007). Otra frecuente respuesta frente a la deficiencia en nutrientes minerales, es la acumulación de aminoácidos como la arginina, glutamina y asparagina, así como de la poliamina putrescina (Rabe, 1990).

Ya que las plantas solo pueden efectuar un empleo óptimo de un nutriente particular sin ningún otro nutriente está realizando un efecto limitante, la deficiencia en un elemento nutritivo, generalmente impacta la absorción y transporte de otros elementos nutritivos (Amtmann y Blatt, 2009; Keller et al., 2001). Cuando una porción del sistema radicular se halla inmersa en un volumen de suelo deficiente en un nutriente particular, la planta a menudo refuerza el desarrollo y los mecanismo de absorción de la porción de sistema radicular que se desarrolla en el volumen de suelo que no presenta tal limitación; sin embargo, ante la existencia de estas situaciones, una disminución del desarrollo en la parte aérea se presenta como respuesta, cuando nutrientes como el N y el P están disponibles únicamente para un porcentaje del sistema radicular (Baker y Milburn, 1965; Robinson, 1994). Las deficiencias nutricionales, particularmente las deficiencias en N y P, puecen también impulsar una serie de respuestas en la vid que guardan similitud con la respuesta frente a una limitación en el suministro hídrico, a saber, incremento en los niveles de ABA y reducción en la producción de citoquininas, incremento del pH del xilema, disminución de la transpiración, restricción en el proceso de expansión del limbo foliar y senescencia de las hojas adultas, e incremento del ratio sistema radicular : parte aérea (Clarkson et al., 2000; Wilkinson y Davies, 2002). Esta respuesta conduce a un descenso en la absorción y transporte de agua en el interior de la vid (Maurel et al., 2008).

La limitación en el acceso a los nutrientes interfiere con el proceso de división celular, impidiendo la progresión normal del ciclo celular, de tal forma que el tiempo necesario para la división celular se ve incrementado (Gastal y Lemaire, 2002; Grossman y Takahashi, 2001; Lemaire y Millard, 1999). En las hojas en desarrollo, tanto la división como el crecimiento celular, disminuye rápidamente como respuesta a la deficiencia de N. Este comportamiento, es, al menos en parte, ocasionado por un descenso de la producción de citoquininas provenientes de los isoprenoides de los ápices radiculares (los nitratos y los fosfatos estimulan la producción de citoquininas) y su transporte a través del xilema hacia los pámpanos además de la reducida producción de citoquininas en las hojas jóvenes (Coruzzi y Zhou, 2001; Forde, 2002; Kakimoto, 2003; Takei et al., 2002). Esta disminución de citoquininas parece ser que también inhibe el desarrollo de las yemas (Ferguson y Beveridge, 2009), de tal forma que en las vides con deficiencias de N, se desarrollan con menos tamaño y en menor número (Keller y Koblet, 1995a). El desarrollo radicular, de forma opuesta, puede verse incrementado de forma notable como

respuesta a un suministro limitado de N (Keller y Koblet, 1995a) y P, pero también lo anterior se vea ocasionado ante limitaciones en el suministro de K y S. Como contraste a la acción que se desarrolla sobre los órganos aéreos, las citoquininas inhibel el desarrollo radicular (Kakimoto, 2003; Werner et al., 2003), lo cual quizás sea debido por la estimulación en la producción de gas etileno (Dugardeyn y Van Der Straeten, 2008). A medida que los niveles de citoquininas en la planta disminuyen, el desrrollo radicular se ve incrementado. Esto significa que cuando los nutrientes actúan como limitantes del desarrollo global de la planta, el sistema radicular se constituye como uno de los principales sumideros de asimilados, con el objetivo de aliviar la deficiencia nutricional a través de una optimización en el proceso de absorción radicular a través de la exploración de regiones del suelo que previamente no habían sido explotadas (Clarkson, 1985).

La ralentización del desarrollo, así como la aparición de clorosis, necrosis y procesos de senescencia en las hojas, constituyen síntomas típicos de la deficiente nutrición mineral de la vid. El desprendimiento de las hojas maduras es a menudo acompañado de una movilización de los nutrientes de esas hojas y su redistribución a órganos en desarrollo como las hojas jóvenes y las bayas de los racimos. Esto es especialmente cierto en el caso de los iones móviles a través del floema (N, P, K, S, Mg, Na y Cl), mientras que los iones inmóviles a través del floema, como el Ca y el B, no pueden sufrir esa redistribución. Como consecuencia de lo anterior, los síntomas de deficiencia en los nutrientes móviles a través el floema, se presentan en primera instancia en las hojas maduras, mientras que los síntomas de deficiencia de los nutrientes inmóviles a través del floema, se localizan en las hojas y tejidos jóvenes.

El portainjerto, constituye otro factor con influencia en la concentración de nutrientes en los tejidos foliares de la variedad, lo cual presenta una influencia capital en las recomendaciones de fertilización efectuadas en base a las analíticas efectuadas sobre limbos y peciolos. De forma frecuente, los cultivares más eficientes en el empleo de los nutrientes, presentan una media en los niveles de concentración de nutrientes, más baja que aquellos cultivares menos eficientes [la eficiencia en el empleo de los nutrientes, es recíproca al coste de nutrientes empleado en el desarrollo de la planta (Bloom et al., 1985)]. Así pues, cuando las vides injertadas son plantadas, si el portainjerto seleccionado es eficiente en la absorción de nutrientes, los aportes de fertilizantes pueden verse minimizados; de forma opuesta, un portainjerto ineficiente a la hora de absorber nutrientes del medio edáfico, pueden provocar una reducción del vigor en la variedad en ubicaciones fértiles.

Las concentraciones de macro- y micronutrientes en los tejidos vegetales, varían de forma significativa entre diferentes variedades (Christensen, 1984). Dependiendo de la variedad, el portainjerto y las condiciones climáticas del momento de muestreo, las cantidades de macronutrientes extraídas del medio por tonelada de uva producida, se encuentran en los siguientes rangos: 1-3 kg N, 0,2-0,4 kg P, 1,5-4 kg K, 0,2-1 kg Ca y 0,05-0,2 kg Mg (Conradie, 1981a; Mullins et al., 1992; Schreiner et al., 2006). Aunque las vides adquieren los nutrientes minerales desde la solución del suelo a través de la absorción radicular, es posible aliviar deficiencias nutricionales de forma temporal a través de aplicaciones foliares. Así, los nutrientes disueltos en agua pueden difundirse a través de la cutícula de la planta, probablemente vía poros polares de la membrana cuticular, pudiendo entonces

hacerse cargo de ellos las células de los tejidos foliares, distribuyéndolos a través del apoplasto (Schönherr, 2000). El proceso de difusión a través de la cutícula es independiente de la temperatura, pero se ve incrementado con los incrementos de humedad ambiental (Schönherr, 2000; Schreiber et al., 2001). Por otro lado, los nutrientes, también pueden ser captados por las células de los tejidos foliares, a través de los estomas (Eichert y Goldbach, 2008).

Cada viñedo se desarrolla bajo unas condiciones edáficas exclusivas del paraje sobre el cual se asienta, y los procesos edafogenéticos que han tenido lugar para evolucionar el material parental inicial son dependientes, en muchos casos, de unas condiciones locales dadas, y por tanto también exclusivas. Lo anterior, da una idea de la complejidad que envuelve al proceso de la nutrición mineral de *Vitis vinífera*; parece entonces lógico, pensar que, el vino, cuya génesis se comienza a gestar en unas condiciones edáficas exclusivas, las cuales influencian de forma determinante la nutrición de la vid, pueda concebirse como perteneciente al ámbito del telurismo, lo cual invita a atribuir al terroir naturaleza telúrica (Olego et al., 2009).

2. OBJETIVOS

El **objetivo global** planteado en esta tesis, es el estudio de los procesos interactivos, a nivel nutricional, que acontecen en un sistema suelo-planta en una plantación de *Vitis vinífera* L. var. Prieto Picudo ubicada en el término municipal de Gordoncillo (León), a partir de la cual se elaboran vinos adscritos a la v. c. p. r. d. Denominación de origen "Tierra de León". Este estudio, nos permitirá avanzar hacia una fertilización más racional y equilibrada de la vid, así como a adquirir un mayor conocimiento sobre el comportamiento nutricional de esta variedad de vid característica de la provincia de León.

Objetivos concretos:

1. Discernir los procesos asociativos que tienen lugar entre los diferentes parámetros nutricionales a nivel de suelo, y a nivel de planta entre el limbo, el peciolo y el sarmiento.

2. Determinar las variables nutricionales, en peciolo, que presenten una mayor idoneidad para su inclusión en técnicas que nos permitan modelizar su comportamiento, con el fin de realizar recomendaciones nutricionales.

3. Evaluar aspectos nutricionales de la vid, a partir de una modelización estadística de variables del peciolo.

4. Determinar las relaciones existentes entre los parámetros nutricionales medidos en suelo, limbo y peciolo, a partir de la elaboración de modelos de regresión estadística.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Los suelos y el material vegetal objeto de estudio, han sido obtenidos de una plantación de *Vitis vinífera* L. cv. Prieto Picudo propiedad de la bodega Gordonzello, S.A., ubicada en la localidad leonesa de Gordoncillo, cuyo término municipal recibe el mismo nombre, a una altitud de 747 m.s.n.m. y delimitada por las siguientes coordenadas geográficas:

- Latitud: 42º 8’ 38,72’’ N – 42º 7’ 58,10’’ N
- Longitud: 5º 25’ 20,52’’ O – 5º 24’ 35,20’’ O

Como principales características geomorfológicas de estos suelos, cabe citar la presencia de gravas de mediano y gran tamaño a lo largo del perfil del suelo, correspondiéndose a suelos cuyo proceso de formación principal es el de aluvionamiento, con incorporación de aportes de otros suelos previamente erosionados.

Según la clasificación de suelos correspondiente a la Soil Taxonomy (2010) corresponde con el orden Inceptisoles (cuyo concepto de suelos incipientes, en formación, debe interpretarse desde el punto de vista de la meteorización, pues podemos encontrarnos ante suelos viejos, pero con un estado de meteorización mínimo), suborden Xerepts en base a su régimen de humedad xérico, grupo Haploxerepts y subgrupo Typic; nos encontramos por lo tanto ante un Typic Haploxerepts. En el mapa de los suelos de Castilla y Leon (García, 1987), los suelos objeto de esta tesis, aparecen cartografiados como Cambisoles Eútricos, según la leyenda correspondiente al Mapa de Suelos de la FAO, indicando que se trata en general de suelos ligeramente ácidos y con una regular saturación de bases.

Se puede apreciar una visión general de la plantación objeto de estudio en las **figuras nº 11 y nº 12**.

Figura nº 11: Vista general de la plantación objeto de estudio. Fuente: SIGPAC

3.2 LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE MUESTREO

Tanto la toma de muestras de suelo, como la de material vegetal (limbos, peciolos y sarmientos), fue efectuada en ocho zonas de la plantación de *Vitis vinífera* L. cv. Prieto Picudo, las cuales fueron distribuidas en base a ofrecer la mayor representatividad posible de la plantación objeto de estudio.

La distribución aproximada de las zonas de toma de muestras de suelo y material vegetal, puede observarse en la **figura nº 13**. La nomenclatura empleada para definir las zonas de muestreo, tiene su origen en la denominación habitual empleada por la bodega propietaria de la parcela en la realización de las labores de campo.

Figura nº 12: Vista general de la plantación objeto de estudio. Fuente: Gordonzello, S. A.

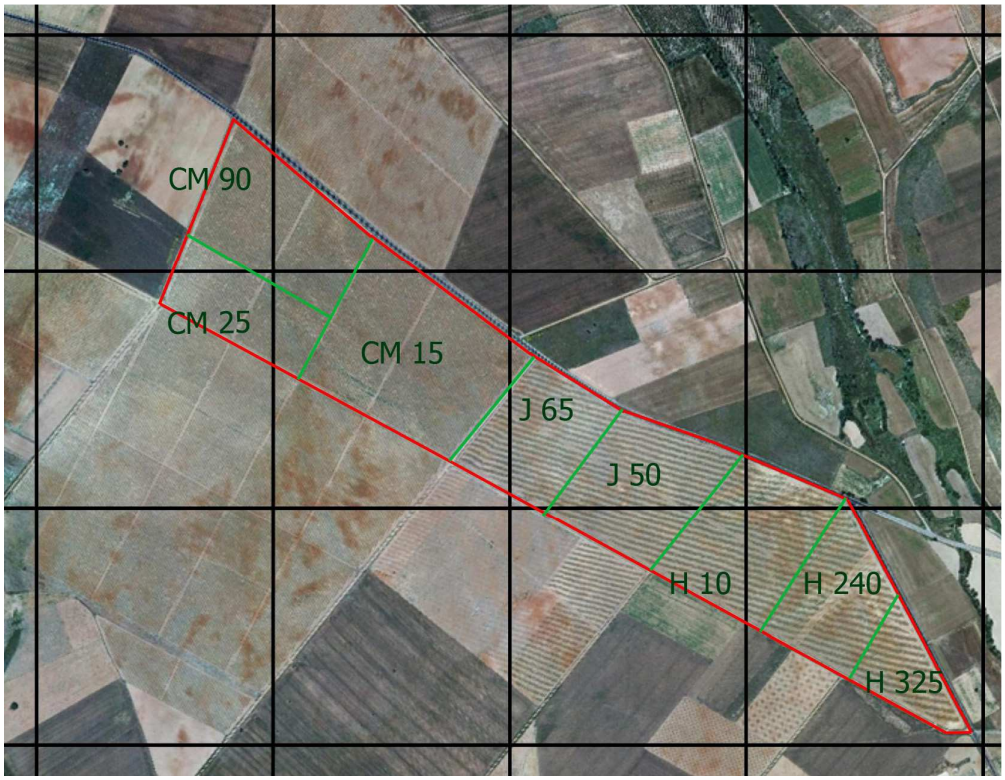


Figura nº 13: Vista general de las zonas de muestreo en la plantación objeto de estudio.

3.3 MÉTODOS DE CAMPO

Para la realización de esta tesis, que se extiende durante los ciclos anuales de cultivo 2007, 2008 y 2009, se han efectuado una serie de trabajos y operaciones de campo, que a continuación se detallan.

3.3.1 Toma de muestras de suelo

Se ha realizado un seguimiento del suelo de cada una de las zonas seleccionadas, vinculado a aquellos momentos en los cuales las plantas de vid se encontraban en los estados fenológicos de brotación, floración, cuajado, envero y caída de hojas, tomándose muestras representativas a la profundidad de 10 – 40 cm (retirando la zona superficial sometida a los agentes atmosféricos de forma directa). Para la obtención de cada una de las muestras, se ha empleado una barrena modelo Riverside, obteniendo submuestras de suelo hasta conformar una muestra homogénea representativa de las condiciones generales de la parcela.

Una vez en el laboratorio, se ha procedido a su acondicionamiento a través del procedimiento aconsejado por los métodos oficiales de análisis (Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación, 1993), para su posterior caracterización físico-química y biológica.

3.3.2 Toma de muestras de material vegetal (limbos y peciolos)

De forma paralela a los muestreos de suelo, en los estados fenológicos de cuajado y envero, se ha realizado un seguimiento del viñedo empleando el diagnostico foliar mediante análisis del contenido en nutrientes del material vegetal. Se han tomado muestras de hojas, limbo y peciolo, en cada una de las zonas en las cuales se había procedido a la toma de muestras de suelo en ese mismo estado fenológico. El material vegetal, fue tomado de una plantación de *Vitis vinífera* L. var. Prieto Picudo injertada sobre patrón 110 Richter, que en el inicio de la toma de muestras presentaba 15 años de edad y sobre la cual se efectúa una poda de tipo doble cordón horizontal “Royat” (Vertical Shoot Position), con cuatro pulgares por vara. Este material vegetal, fue transportado en condiciones de refrigeración hasta el laboratorio, en el cual se procedió a realizar un proceso de acondicionamiento del mismo, siguiendo las directrices de los métodos oficiales de análisis (Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación, 1993).

3.3.3 Toma de muestras de sarmientos

Ha consistido en un muestreo de sarmientos en las zonas de seguimiento en la época de poda (en concreto, en los meses de Diciembre), momento en el cual la planta de vid se encuentra en parada vegetativa. En los sarmientos recogidos, se ha procedido a realizar una separación de los mismos en tres zonas, las cuales han sido denominadas como basal, media y distal.

3.4 MÉTODOS DE LABORATORIO

3.4.1 Técnicas empleadas en suelos

Las muestras de suelo correspondientes a la profundidad de 10-40 cm obtenidas en los sucesivos muestreos de las parcelas, deben de ser acondicionadas antes de realizar los distintos análisis, de tal forma que dichas muestras procedieron a ubicarse en gavetas de plástico para su desecación al aire. Una vez secas se han pasado por un tamiz de 2 mm de luz, de tal forma que las partículas del suelo conocidas como elementos gruesos no pueden pasar a través del mismo, obteniendo lo que se denomina “tierra fina seca al aire” (T.F.S.A.).

Sobre esta fracción obtenida después del tamizado, se realizaron diversas determinaciones analíticas (**Anexo I**); se detallan a continuación, los procedimientos empleados:

3.4.1.1 Determinación de la clase textural

La textura de una muestra de suelo, expresa las proporciones de los tamaños de las partículas minerales que contiene.

Se procedió a la separación de los agregados del suelo en partículas minerales individuales, para lo cual se efectuó una agitación de las muestras en una solución de hexametafosfato sódico y carbonato sódico.

Se determinaron los porcentajes de arena, limo y arcilla de acuerdo con la escala USDA, a través de la determinación por vía húmeda mediante el método del densímetro de Bouyoucos (basado en la ley de Stoke) y representación gráfica en el diagrama triangular U.S.D.A.

3.4.1.2 pH en agua

La medida del pH en una suspensión suelo/agua, se basa en la transformación de la señal eléctrica obtenida con un electrodo de vidrio (indicador) y uno de referencia. Dicha señal es proporcional a la actividad de los iones H_3O^+, de acuerdo con la ley de Nernst.

El pH en agua se determinó potenciométricamente en una suspensión suelo/agua, de relación 1/2,5 (p/v) (Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación, 1993), con un pH-metro marca CRISON modelo 2001, con corrector automático de temperatura.

3.4.1.3 pH en KCl

El pH en cloruro potásico, se determinó en las mismas condiciones que el anterior, empleando una suspensión suelo/KCl 1N, de relación 1/2,5 (p/v) (Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación, 1993), con un pH-metro marca CRISON modelo 2001, con corrector automático de temperatura.

3.4.1.4 Conductividad eléctrica

La conductividad es la capacidad de una disolución de conducir la corriente eléctrica, constituyendo así pues, una medida de la concentración iónica total que tiene una disolución.

El conductímetro mide la conductividad eléctrica de los iones en una disolución. Para ello aplica un campo eléctrico entre dos electrodos y mide la resistencia eléctrica de la disolución.

La conductividad eléctrica se midió con un conductímetro marca CRISON, modelo 522, en una suspensión suelo/agua de relación 1/2,5 (p/v) (Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación, 1993).

3.4.1.5 Materia orgánica

Se determinó el carbono orgánico según el método de oxidación húmeda (Métodos oficiales de análisis; Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación, 1993) propuesto originalmente por Walkley y Black, a excepción del indicador usado, que fue ortofenantrolina en lugar de difenilamina. En el citado método, se determina el carbono orgánico del suelo que se oxida con dicromato potásico en presencia de ácido sulfúrico. El exceso oxidante se valora con sulfato ferroso amónico (sal de Mohr) y la cantidad de carbono orgánico oxidado se calcula a partir de la cantidad de dicromato reducido.

Para la estimación de la materia orgánica, se multiplicó el contenido de carbono orgánico por 1,724.

3.4.1.6 Bases de cambio (Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^{+})

Los cationes intercambiables del suelo son extraídos mediante acetato amónico 1N a pH 7 (Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación, 1993), cuantificándose en dicho extracto su concentración.

El calcio y el magnesio se determinaron por absorción atómica; el potasio por emisión de llama. Las determinaciones se realizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica UNICAM SOLAAR Series 969, con lámparas de cátodo hueco a las longitudes de onda correspondientes para cada elemento.

La concentración de las bases de cambio, se expresan en $\mathrm{cmol}(+) \cdot \mathrm{kg}^{-1}$

3.4.1.7 Fósforo soluble en bicarbonato sódico (Método Olsen - Watanabe)

Su determinación supone la cuantificación del fósforo asimilable o fácilmente soluble; se aplicó el método de Olsen – Watanabe, efectuándose una extracción con bicarbonato sódico a pH 8,5; y posterior cuantificación del fósforo mediante lectura en espectrofotometría visible a una longitud de onda de 882 nm, empleando un espectrofotómetro Spectronic 1201 Milton-Roy.

3.4.1.8 Micronutrientes ($Fe^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}$ y Mn^{2+})

Los microelementos objeto de estudio presentes en el suelo, han sido extraídos, de acuerdo a lo descrito por Lindsay y Norwell (1978), mediante la solución extractora conformada por ácido dietilen triamino pentaacético (DTPA) y cloruro cálcico, tamponada a pH 7,3 con trietanolamina.

La determinación de estos elementos se efectuó por absorción atómica. Las determinaciones se realizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica UNICAM SOLAAR Series 969, con lámparas de cátodo hueco a las longitudes de onda correspondientes para cada elemento.

3.4.1.9 Aluminio de cambio

Se determinó el Al de cambio, desplazándolo del suelo con una disolución de KCl 1N, según el método de Lin y Coleman (1960) y de Litle (1964). El Al se analizó, por espectrofotometría de emisión de plasma (ICP), expresándose en $\mathrm{cmol}(+) \cdot \mathrm{kg}^{-1}$.

3.4.2 Técnicas empleadas en material vegetal (limbos y peciolos)

El material foliar transportado hasta el laboratorio, ha sido lavado con detergentes no iónicos, para eliminar residuos de polvo y materias fitosanitarias, introduciéndose posteriormente en estufa para su desecación (72 horas a 60 grados ºC) hasta peso constante (Villalbí, 1988). Una vez desecadas las hojas, se ha separado el limbo del pecíolo y se han triturado por separado, utilizando un molino de martillos CULATTI modelo DFH48 LL hasta conseguir que pasen por un tamiz de 1 mm de luz para su posterior análisis. Sobre este material final, finamente triturado, se ha realizado una extracción, mediante ataque ácido (mezcla ternaria de ácidos sulfúrico, nítrico y perclórico a 420 ºC durante 25 minutos), y una determinación de cationes (calcio, magnesio, sodio y potasio; **Anexo II** y **III**) y micronutrientes (hierro, manganeso, zinc, cobre y boro; **Anexo II** y **III**) utilizando ICP-AES (PERKIN ELMER Plasma 1000). El fósforo (**Anexo II** y **III)** ha sido cuantificado mediante lectura en espectrofotometría visible a una longitud de onda de 430 nm (Murphy and Riley, 1962), empleando un espectrofotómetro Spectronic 1201 Milton-Roy.

3.4.3 Técnicas empleadas en sarmientos

Los sarmientos transportados hasta el laboratorio divididos ya en las zonas reseñadas anteriormente, han sido introducidos en estufa para su desecación (72 horas a 60 grados ºC) hasta peso constante (Villalbí, 1988). Una vez desecados, se han triturado empleando un molino de cuchillas IKA LABORTECHNIK MF 10basic hasta conseguir que pasen por un tamiz de 2 mm de luz para su posterior análisis. Sobre este material final, finamente triturado, se han realizado una extracción, mediante ataque ácido (mezcla ternaria de ácidos sulfúrico, nítrico y perclórico a 420 ºC durante 25 minutos), y una determinación de cationes (calcio, magnesio, sodio y potasio; **Anexo IV**) y micronutrientes (hierro, manganeso, zinc, cobre y boro; **Anexo IV**) utilizando ICP-AES (PERKIN ELMER Plasma 1000). El fósforo (**Anexo IV**) ha sido cuantificado mediante lectura en espectrofotometría visible a una longitud de onda de 430 nm (Murphy and Riley, 1962), empleando un espectrofotómetro Spectronic 1201 Milton-Roy.

3.5 MÉTODOS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

Los resultados de los análisis de suelo, material foliar y sarmientos fueron objeto de diversos tratamientos estadísticos, los cuales fueron llevados a cabo a través del paquete de análisis estadístico SPSS versión 17 (Licencia adquirida por la

Universidad de León); se expone a continuación una somera base teórica para la comprensión de los mismos.

3.5.1 Análisis de componentes principales

Las técnicas de análisis exploratorio factorial (de las cuales forma parte la técnica de Análisis de Componentes Principales) se constituye como una técnica de identificación de grupos de variables. Esta técnica presenta tres usos principales: (1) como vía de comprensión de la estructura de un conjunto de variables; (2) para la identificación y valoración de variables subyacentes; y (3) para reducir un conjunto de datos a un tamaño más manejable mientras se retiene la mayor cantidad posible de información.

3.5.1.1 Los Factores (Componentes)

En la medición de un grupo de variables, las correlaciones entre cada pareja de las mismas pueden ser dispuestas en lo que se conoce como matriz-R. La matriz-R es simplemente una matriz de correlaciones: una tabla de coeficientes de correlación entre variables. Los elementos diagonales de una matriz-R son todos unos, ya que cada variable correlaciona de forma perfecta consigo misma. Los elementos que se encuentran fuera de esta diagonal, son los coeficientes de correlación entre pares de variables. La existencia de grupos con coeficientes de correlación elevados entre subgrupos de variables, sugiere el hecho de que esas variables que conforman los subgrupos podrían medir aspectos de una misma dimensión subyacente.

Estas dimensiones subyacentes, reciben la denominación de factores (o variables latentes). A través de la reducción de un conjunto de datos procedentes de un grupo de variables interrelacionadas, a un conjunto más pequeño de factores, el análisis factorial alcanza la explicación de la máxima cantidad de varianza común en una matriz de correlaciones, empleando el menor número de factores explicativos.

En el análisis factorial el esfuerzo se traduce en la reducción de la matriz-R a sus dimensiones subyacentes mediante la observación de aquellas variables que den la apariencia de agruparse de forma significativa. Esta reducción de datos es alcanzada a través de la observación de aquellas variables que correlacionan de forma elevada en un grupo de variables, pero a su vez de forma muy débil con las variables que no forman parte de ese grupo.

Los factores (o componentes) son entidades estadísticas que pueden ser visualizadas como ejes de clasificación a lo largo de los cuales se valoran variables que pueden ser representadas gráficamente. En un lenguaje sencillo, la anterior aseveración significa que se pueden imaginar los factores (o componentes) como ejes de un gráfico, de tal modo que podemos representar las variables de interés a lo largo de esos ejes. Las coordenadas de las variables a lo largo de cada eje, representan la intensidad de la relación entre las variables y cada factor (o componente).

Si cada eje del gráfico representa un factor (o componente), la interpretación se vería facilitada por el hecho de que cada variable presentara una coordenada

elevada para uno de los ejes, y pequeñas coordenadas para el resto de factores (o componentes). La coordenada de cada variable a lo largo de un eje de clasificación, recibe la denominación de “puntuación en la componente”. La puntuación en la componente puede ser conceptualizado como el coeficiente de correlación de Pearson entre la componente y la variable.

Los ejes de los factores (o componentes) son trazados como líneas rectas, y como tales son descritas de forma matemática por la ecuación de una línea recta. Por lo tanto, los factores (o componentes) pueden ser descritos en términos de estas ecuaciones, con la peculiaridad de no presentarse el término de intercepción en esta ecuación, siendo la razón de que la intercepción se produce en el cero (por lo tanto, dicho término de la ecuación es cero). Los coeficientes de regresión en la ecuación $(b_1 b_2 \ldots b_n)$, representan las cargas en los componentes. Por lo tanto, los factores (o componentes), pueden ser descritos en función de las variables medidas y de la relativa importancia de cada una de ellas para cada factor (o componente).

$$y_i = b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i} + \ldots + b_n x_{ni} + \varepsilon_i$$
$$\text{Factor}_i = b_1 \text{Variable}_{1i} + b_2 \text{Variable}_{2i} + \ldots + b_n \text{Variable}_{ni} + \varepsilon_i$$

Estas puntuaciones en los componentes pueden ser ubicadas en una matriz en las cual las columnas representan a las componentes y las filas representan las puntuaciones de cada variable en la componente correspondiente. Esta matriz, se representa habitualmente como matriz A, y atiende a la denominación de matriz factorial o matriz de componentes en el caso que nos atañe de análisis de componentes principales.

En el paquete de análisis estadístico SPSS versión 17 (Licencia adquirida por la Universidad de León), se ofrecen una serie de posibilidades a la hora de obtener las puntuaciones de las variables en los componentes; si deseamos asegurar que dichas puntuaciones se encuentren incorreladas, emplearíamos el método de Anderson-Rubin, pero si las correlaciones entre las puntuaciones de las componentes son aceptables, emplearíamos el método de Regresión.

Los coeficientes de puntuación de las componentes pueden ser calculados a través de diversos medios; el más simplista es el método de regresión, en el cual las puntuaciones de las componentes son ajustadas teniendo en consideración las correlaciones iniciales entre las variables. Para la obtención de la matriz de estos coeficientes de puntuación de las componentes (representada habitualmente como matriz B), se procede a la realización del producto la matriz de las puntuaciones de los componentes por la matriz inversa de la matriz de correlaciones R (R^{-1}); conceptualmente hablando, estamos dividiendo las puntuaciones de los componentes por los coeficientes de correlación. La matriz resultante, representa por lo tanto, la relación entre cada variable y cada componente, habida cuenta de la relación original entre cada par de variables.

Una cosa debe de ser considerada, la técnica de análisis de componentes principales, es una técnica exploratoria de datos que asume que la muestra empleada es la población, y por lo tanto los resultados obtenidos, no pueden ser extrapolados más allá del conjunto de datos manipulados.

Es importante comprender una serie de cuestiones básicas sobre la varianza dentro de la matriz R. Es posible calcular la variabilidad en las puntuaciones (la varianza) para cualquier variable, de tal manera que la varianza total para una variable en particular, tendrá dos componentes: una parte de la misma será compartida con las otras variables (varianza común) y otra parte será específica de la variable (varianza única).

No obstante, también hay una parte de la varianza que es específica de la variable pero no presenta credibilidad; esta varianza recibe la denominación de varianza aleatoria. La proporción de varianza común presente en una variable, es conocida como comunalidad. Así, una variable que no tenga una parte de varianza específica de ella misma, tendrá un valor de comunalidad igual a 1; por el contrario, una variable que no comparta nada de su varianza con cualquier otra variable, tendrá una comunalidad igual a cero.

Las comunalidades pueden ser conceptualizadas, como una medida de la proporción de varianza explicada por los componentes extraídos.

A partir de de la matriz que representa las relaciones existentes entre las variables (matriz-R); los componentes lineales de la matriz son calculados a través de la determinación de los autovalores de la matriz. Estos autovalores son empleados en el cálculo de los autovectores, los elementos de los que provienen las puntuaciones de una variable en particular en una componente determinada (los valores de b en la ecuación de regresión anteriormente plasmada). Los autovalores, constituyen también una medida de la importancia de los autovectores con los cuales se encuentran asociados.

3.5.1.2 Extracción de los componentes

Los autovalores se encuentran asociados a la importancia sustantiva que presentan los componentes, por lo tanto, resulta lógico que se retengan exclusivamente aquellos componentes con elevados autovalores; el debate se presenta entonces en tomar la decisión acerca de decidir cuándo es suficientemente elevado el valor que toma un autovalor para considerar que un componente debe de ser retenido.

En este sentido se han propuesto diversos criterios; uno de ellos, preconizado por Cattell (1966b), es el de representar gráficamente cada autovalor (eje Y) frente a los componentes con los cuales se encuentran asociados (eje X). Esta representación gráfica, recibe la denominación de gráfico de sedimentación. Habitualmente, aparecerán unos pocos componentes asociados a unos valores elevados de los autovalores, de tal forma que el gráfico presentará una forma característica: un rápido descenso de la curva, el cual disminuirá de una forma gradual.

La selección de los componentes, no puede basarse exclusivamente en el anterior criterio. Kaiser (1960), recomienda retener todos aquellos componentes cuyos autovalores sean superiores a la unidad. Este criterio, está basado en la idea de que los autovalores representan la cantidad de variación explicada por un

componente, de tal forma que un autovalor mayor que la unidad, representará una cantidad de variación sustancial.

Jollife (1986), publicó que el criterio de Kaiser resultaba ser demasiado estricto, sugiriendo como opción, retener todos aquellos componentes cuyos autovalores fueran superiores a 0.7.

3.5.1.3 Rotación de los componentes: perfeccionando la interpretación

De forma habitual, nos encontraremos con que la mayor parte de las variables presentan elevadas puntuaciones en un componente, mientras que las puntuaciones serán más pequeñas en el resto de componentes. Esta característica, provoca que la interpretación se muestre dificultosa, de tal forma que a través de la técnica de rotación de los componentes se puede realizar un proceso más selectivo de los componentes.

Si un componente, es un eje de clasificación a lo largo del cual las variables pueden ser representadas gráficamente, entonces la rotación de los componentes rotará de forma eficiente los ejes de tal forma que las variables presenten puntuaciones maximizadas para un único componente. Se pueden ejecutar dos tipos de rotación (**Figura nº 14)**, bien la de tipo ortogonal, o bien la de tipo oblicua (la diferencia entre ambas, radica en la existencia o no de correlación entre los componentes, de tal forma que la ortogonal asegura que los componentes se mantengan incorrelados, mientras que en la oblicua se permite que correlacionen).

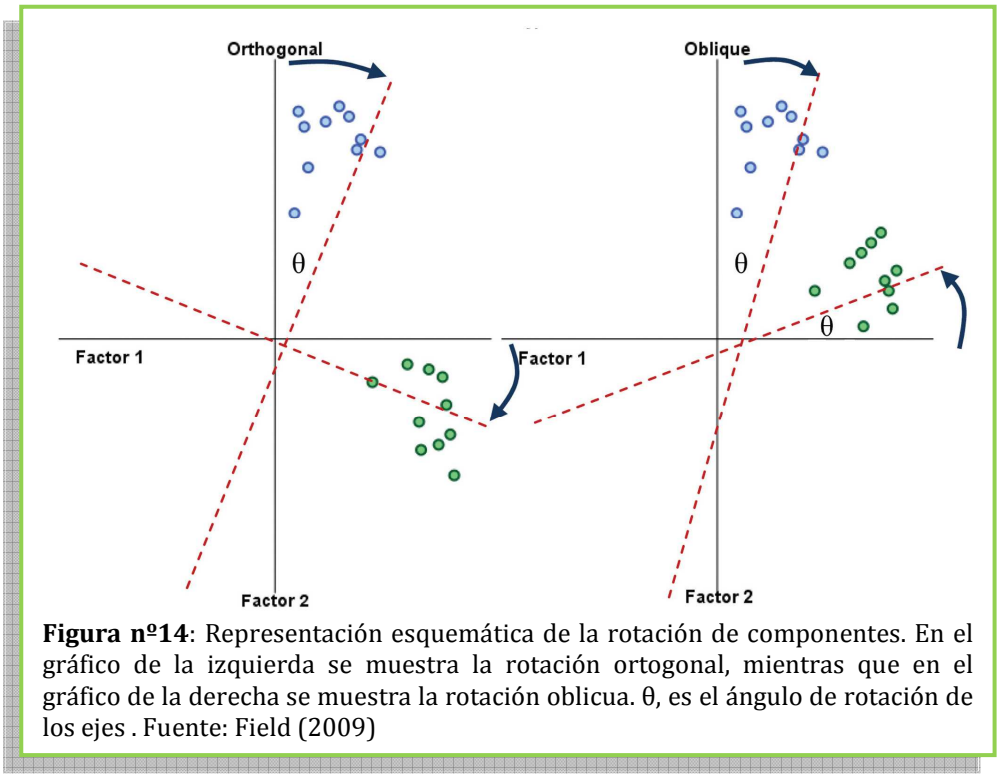


Figura nº14: Representación esquemática de la rotación de componentes. En el gráfico de la izquierda se muestra la rotación ortogonal, mientras que en el gráfico de la derecha se muestra la rotación oblicua. θ, es el ángulo de rotación de los ejes . Fuente: Field (2009)

La rotación oblicua, solo debe de ser empleada, si se supone que los componentes subyacentes podrían estar relacionados desde un punto de vista

teórico, lo cual puede ser contrastado a partir de las correlaciones existentes entre cada uno de los componentes extraídos.

3.5.1.4 La importancia de las puntuaciones en los componentes

Una vez que se observa una estructura de componentes, es importante decidir que variables configuran esos componentes. Las puntuaciones de los componentes se constituyen como un indicador de la importancia sustancial de una variable dada en un componente cualquiera. Por lo tanto, parece de sentido común el empleo de estas puntuaciones para ubicar las variables en uno u otro componente. Stevens (2002), recomienda intentar interpretar únicamente aquellas puntuaciones de los componentes con un valor absoluto mayor de 0.4

3.5.2 Análisis de correlación canónica

En el análisis de correlación canónica, técnica de correlación lineal, computaremos coeficientes a partir de los cuales mediremos el grado de relación lineal entre conjuntos de variables. En el análisis de correlación canónica, a partir de las variables de cada conjunto, obtenemos los variados canónicos de los conjuntos a través de la suma ponderada de variables, de tal forma que la correlación canónica es la correlación lineal entre los variados canónicos.

En esta investigación, esta técnica es empleada con ánimo de calcular la varianza explicada en un grupo de variables de interés, a partir de otro grupo de variables.

3.5.3 Regresión lineal múltiple

3.5.3.1 El modelo lineal general

Sean $x_1, x_2, \dots, x_k$ k variables de predicción, las cuales pueden presentar alguna influencia sobre una variable y, supóngase que el modelo tiene la forma donde y_i es la i-ésima observación de la respuesta para un conjunto de valores fijos $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}$ de las variables de predicción, ϵ_i es el error aleatorio no observable asociado con y_i, y $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ son $m = k + 1$ parámetros lineales desconocidos. La ecuación

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \cdots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

recibe el nombre de modelo lineal general y da origen a lo que se conoce como una regresión lineal múltiple (Canavos, 1988).

3.5.3.2 El análisis de regresión lineal

La esencia del análisis de regresión lineal, es la de adecuar un modelo a nuestros datos y emplear el mismo con el objeto de predecir valores de la variable independiente a partir de una o más variables independientes. El análisis de regresión lineal es una vía de predicción para una variable a partir de una variable predictiva (regresión lineal simple) o varias variables predictivas (regresión lineal múltiple).

En la regresión lineal, el modelo que buscamos como más adecuado para nuestros datos es lineal; lo anterior, simplemente significa, que abstraemos nuestro conjunto de datos a una línea recta. A través de esta técnica de regresión, deseamos establecer el mejor modelo para nuestros datos, empleando para ello una técnica matemática denominada "método de los mínimos cuadrados", por medio de la cual establecemos la línea recta que con mayor precisión define el conjunto de datos reunidos a través de nuestro período de prospección de los mismos.

Toda línea recta puede ser definida por medio de dos parámetros: (1) la pendiente (o gradiente) de la línea (usualmente b_1) y (2) el punto en el cual la línea cruza el eje vertical del gráfico (conocido como punto de intercepción,b_0).

De hecho, nuestro modelo general se erige en una ecuación en la cual y_i se constituye como la variable que deseamos predecir, x_i como la variable predictiva i-ésima, b_1 es la pendiente de la línea recta (la cual nos informa de la naturaleza de la relación que describimos a través del modelo) y b_0 como el punto de intercepción de esta línea con el eje vertical (los parámetros b_1 y b_0 reciben la denominación de coeficientes de regresión, apareciendo en muchas ocasiones referidos como b_i o simplemente b). En el modelo general existe también un término residual que se denota por ε_i, que representa la diferencia existente entre el valor predicho por la línea para el caso i y el valor real que el caso i presenta. Así pues, el modelo general presenta la siguiente forma:

$$y_i = (b_0 + b_1 x_i) + \varepsilon_i$$

La regresión lineal múltiple es, en cierta forma, una extensión de la regresión lineal simple, de tal forma que nos permite emplear más de una variable independiente. El objetivo de la regresión múltiple, es el mismo que el de la simple; es decir, deseamos emplear la relación existente entre la variable respuesta (dependiente) y las variables predictivas (independientes), de tal forma que se pueda predecir el comportamiento de la variable respuesta. No obstante, su interpretación, puede resultar más dificultosa que en el caso de la regresión simple, de forma principal, a causa la posible relación existente entre las variables independientes.

3.5.3.3 El modelo de regresión lineal múltiple

Las suposiciones en las que se basa el análisis de regresión múltiple son las siguientes:

1. Las $x_i$son variables no aleatorias (fijas). Esta suposicion distingue al modelo de regresion multiple del modelo de correlacion multiple. Esta condición indica que cualquier inferencia que se haga de los datos de la muestra solo se aplica al con junto de valores de x observados y no para algún conjunto mayor de valores de x. Bajo el modelo de regresión, el análisis de correlación carece de significado.
2. Para cada conjunto de $x_i$valores existe una subpoblacion de valores de *y.* Para construir algunos intervalos de confianza y probar hipótesis se debe saber, o el investigador debe inclinarse a suponer que, estas subpoblaciones de valores de *y* siguen una distribucion normal.
3. Las variancias de las subpoblaciones de *y* son todas iguales.

4. Los valores de *y* son independientes. Esto es, los valores de *y* seleccionados para un conjunto de valores de x no dependen de los valores de *y* seleccionados en otro conjunto, de valores de x.

El modelo de regresión lineal múltiple, es una extensión directa del modelo de regresión lineal simple

$$y = \beta_0 + \beta_1 + \epsilon$$

es decir

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_m x_m + \epsilon$$

donde

- y, es la variable dependiente
- $x_j,\ j = 1,2,\ldots,m$ representa m diferentes variables independientes
- β_0 es el valor de y cuando todas las variables independientes tienen por valor cero
- $\beta_1,\ j = 1,2,\ldots,m$ representa los m coeficientes de regresión correspondientes
- ε, es el error del modelo, habitualmente asumido normalmente distribuido, con media cero y varianza σ^2

Aunque la formulación del modelo aparenta ser una simple generalización del modelo de una única variable independiente, la inclusión de varias variables independientes crea un nuevo concepto en la interpretación de los coeficientes de regresión. Así pues, en la regresión múltiple, los coeficientes ligados a cada una de las variables independientes deben medir el cambio medio en la variable dependiente asociados con los cambios en esa variable independiente, mientras el resto de las variables independientes permanecen fijas. Esta, es la interpretación estándar para los coeficientes de regresión en un modelo de regresión múltiple.

3.5.3.4 Estimación de los coeficientes

Ya hemos indicado que el modelo de regresión lineal múltiple tiene la forma siguiente

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_m x_m + \epsilon$$

Para estimar los coeficientes de regresión, empleamos un grupo de n valores observados en m+1 parámetros $(x_1, x_2, \ldots, x_m, y)$ y empleamos el principio de mínimos cuadrados para obtener la siguiente ecuación de estimación de la media de y

$$\hat{\mu}_{yx} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \cdots + \hat{\beta}_m x_m$$

El principio de mínimos cuadrados, especifica que las estimaciones $\hat{\beta}_i$, minimizan el error de la suma de cuadrados

$$\mathrm{SSE} = \sum (y - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_1 - \cdots - \hat{\beta}_m x_m)^2$$

Por conveniencia, se redefine el modelo.

$$y = \hat{\beta}_0 x_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \cdots + \hat{\beta}_m x_m + \varepsilon$$

Donde x_0 es una variable cuyo valor es 1 para todas las observaciones. La suma de cuadrados de los errores es minimizada siendo ahora escrita en la siguiente forma

$$SSE = \sum (y - \hat{\beta}_0 x_0 - \hat{\beta}_1 x_1 - \cdots - \hat{\beta}_m x_m)^2$$

Los mínimos cuadrados estimados son provistos por la solución del siguiente sistema de (m+1) ecuaciones lineales con (m+1) parámetros desconocidos $(\beta_0, \beta_1, \ldots, \beta_m)$.

$$\beta_0 n + \beta_1 \sum x_1 + \beta_2 \sum x_2 + \cdots + \beta_m \sum x_m = \sum y$$

$$\beta_0 \sum x_1 + \beta_1 \sum x_1^2 + \beta_2 \sum x_1 x_2 + \cdots + \beta_m \sum x_1 x_m = \sum x_1 y$$
$$\beta_0 \sum x_2 + \beta_1 \sum x_2 x_1 + \beta_2 \sum x_2^2 + \cdots + \beta_m \sum x_2 x_m = \sum x_2 y$$

… … … … … … … … … … … … … … … … … … …..

$$\beta_0 \sum x_m + \beta_1 \sum x_m x_1 + \beta_2 \sum x_m x_2 + \cdots + \beta_m \sum x_m^2 = \sum x_m y$$

3.5.3.5 El método de los mínimos cuadrados

La “línea recta más apropiada”, es hallada a través de una verificación de que posible línea recta, de entre todas las líneas rectas que podrían ser trazadas, presenta la propiedad de minimizar la diferencia entre los puntos observados en el grafico y aquellos por los cuales atraviesa la línea recta.

Estamos interesados en las diferencias verticales entre la línea recta y los datos reales, ya que la línea recta constituye nuestro modelo: la empleamos para predecir valores de y (variable dependiente) a partir de valores de x (variable/s independiente/s). En regresión lineal, estas diferencias reciben el nombre de “residuales”. Si el cuadrado de las diferencias es grande, la línea recta no es representativa de los datos; si el cuadrado de las diferencias es pequeño, la línea recta se muestra representativa de los datos.

La suma del cuadrado de las diferencias es conocida como la “suma total de cuadrados(SS_T)”. Este valor representa hasta que punto se puede emplear la media como modelo de los datos observados.

La “suma del cuadrado de los residuales” o “suma residual de los cuadrados” (SS_R), representa el grado de inexactitud cuando el mejor de los modelos hallados se contrasta con nuestros datos.

La mejora en la predicción resultante del empleo del modelo de regresión frente al empleo de la media, es calculada a través de la diferencia entre SS_T y SS_R. Esta diferencia, nos muestra el incremento en el grado de exactitud alcanzado a través del empleo del modelo de regresión lineal, recibiendo esta mejora la denomonación de "suma modelo de los cuadrados" (SS_M). Si el valor de SS_M es grande, entonces el modelo de regresión lineal es muy diferente respecto de la media en la tarea de predecir la variable dependiente. Esto implica que el modelo de regresión ha supuesto una gran mejora en la predictibilidad de la variable dependiente. Si por el contrario, el valor de SS_M es pequeño, entonces el empleo del modelo de regresión lineal ofrece una mejora inapreciable con respecto al empleo de la media.

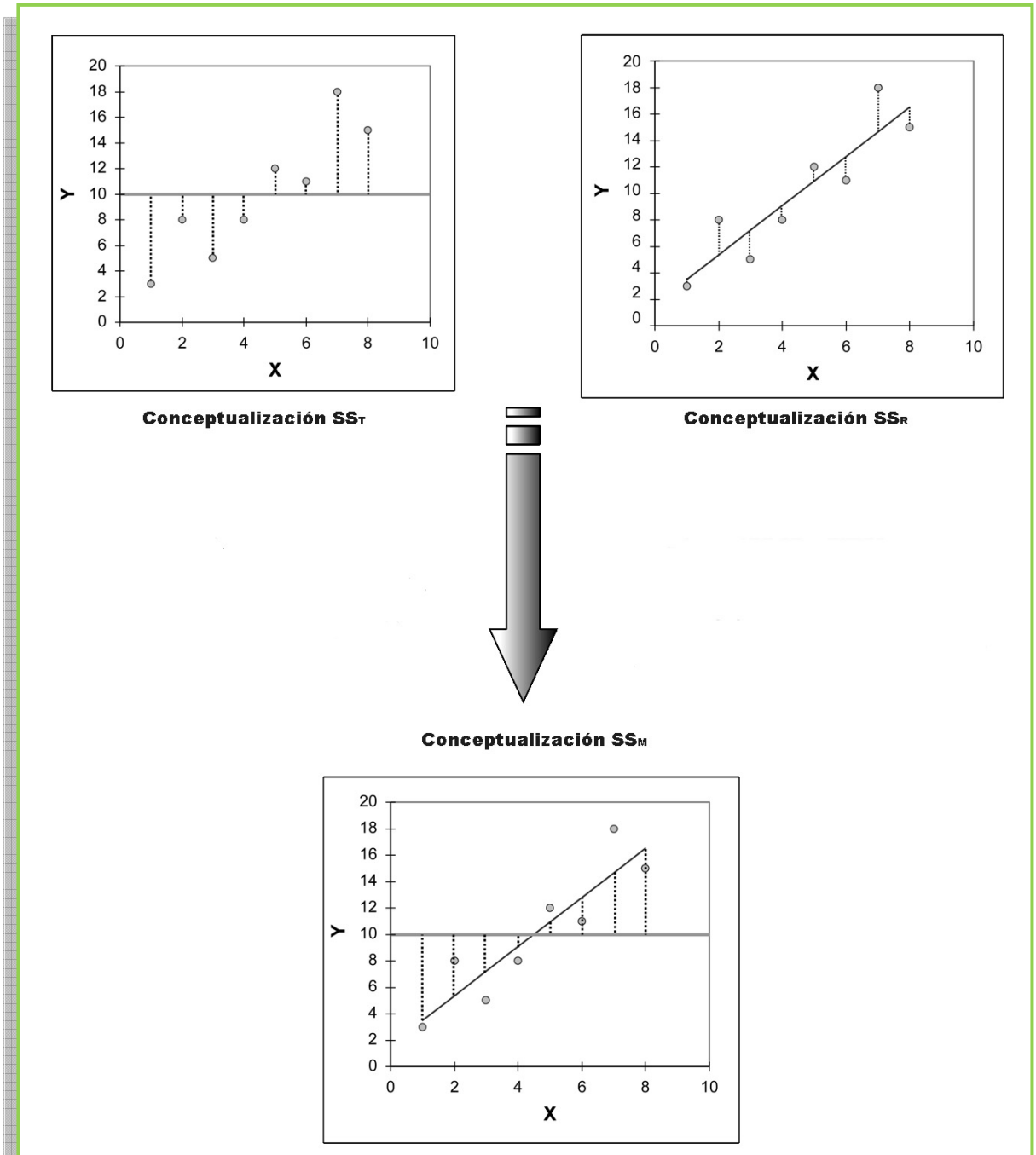


Figura nº 15: Conceptualización de las sumas de cuadrados. Imagen superior izquierda: diferencia entre los datos observados y el valor de la media de y (variable dependiente). Imagen superior derecha: diferencia entre los datos observados y la recta de regresión lineal. Imagen inferior central: diferencia entre el valor de la media de y (variable dependiente) y la recta de regresión. Adaptado de Field (2009)

De una forma gráfica, la conceptualización de las sumas de cuadrados podría ser la que se observa en la **figura nº 15**.

Un parámetro útil procedente de estas sumas de cuadrados, es la proporción de mejora a causa del empleo del modelo, siendo fácilmente calculado a través del cociente entre SS_M y SS_T. El valor resultante recibe la denominaciónR^2, y expresa el porcentaje de variación en la variable dependiente que puede ser explicado a través del modelo.

$$R^2 = \frac{SS_M}{SS_T}$$

En la regresión lineal simple, podemos emplear la raíz cuadrada de este valor para obtener el "coeficiente de correlación lineal de Pearson".

Otro empleo de las sumas de cuadrados radica en el hecho de evaluar el modelo a través del test F (este estadístico, se puede abstraer como cociente entre la variación sistemática y la variación no sistemática); este estadístico F, se basa en el índice de mejora debido al empleo del modelo de regresión lineal (SS_M) y la diferencia existente entre el modelo y los datos obtenidos (SS_R). Como las sumas de cuadrados son dependientes del número de diferencias que hayamos adicionado, empleamos la media de las sumas de cuadrados (referidas como cuadrado de las medias o MS) obteniendo las mismas dividiendo la sumas de cuadrados entre los grados de libertad correspondientes, que para SS_M correspondería al número de variables existentes en el modelo, mientras que para SS_R sería el número de observaciones menos el número de parámetros estimados (es decir, el número de coeficientes de regresión incluida la constante).

$$F = \frac{MS_M}{MS_R}$$

Si el modelo es bueno, entonces esperamos que la mejora en la predicción a causa del empleo del modelo sea grande (de tal forma que MS_M será un valor grande) y la diferencia entre el modelo y los datos observados será pequeña (de tal forma que MS_R será un valor pequeño). De forma abreviada, un buen modelo de predicción debe presentar un valor del estadístico F grande (al menos >1).

3.5.3.6 Evaluación de los predictores

El valor que toma el coeficiente de regresión (b), representa la variación en la variable dependiente resultante de una variación unitaria en la variable predictiva. Si una variable predictiva, predice de forma significativa a la variable dependiente, entonces tendrá un coeficiente de regresión (b) significativamente distinto de cero. Esta hipótesis, es testada a través de un test-t; a través del estadístico t, testamos la hipótesis nula de que el valor del coeficiente de regresión (b) es cero.

Para estimar el error que podríamos obtener en la obtención de b, empleamos el error estándar, el cual nos ofrece una indicación de las hipotéticas diferencias en los valores de b a través de diferentes muestras.

$$t = \frac{b_{observada} - b_{esperada}}{SE_b}$$

La $b_{esperada}$ es simplemente aquel valor de b que cabría esperar obtener si la hipótesis nula fuese cierta (siendo la hipótesis nula $b = 0$, de tal forma que este valor puede ser reemplazado por cero).

Como regla general, si la significación observada en el test-t empleado para contrastar la hipótesis nula de $b = 0$ es inferior a 0.05, se asume que b es significativamente diferente de cero; dicho de otra forma, la variable predictiva realiza una contribución significativa en la predicción de la variable dependiente.

3.5.3.7 El problema de la multicolinealidad

La colinealidad es un problema del análisis de regresión que consiste en que los predictores del modelo están relacionados constituyendo una combinación lineal. Este hecho tiene consecuencias fundamentales en el modelo de regresión: si los predictores se encuentran en combinación lineal, la influencia de cada uno de ellos en el criterio no puede distinguirse al quedar solapados unos con otros; no se consigue una explicación del fenómeno en cuestión; los pronósticos no son nada fiables, puesto que otra combinación de predictores introducida en el modelo variando el orden, produce predicciones en el criterio contradictorias; no se realiza una selección adecuada del orden de entrada de los regresores en el modelo, y un largo etcétera. Es un problema que no tiene fácil solución, ya que en definitiva se trata de pedirle a la muestra de datos más información de la que posee (Peña, 1987). Cuando este problema de multicolinealidad surge, no es posible separar la influencia propia sobre la variable dependiente de cada una de las variables independientes, produciéndose el efecto de un incremento en los errores estándar de los coeficientes de regresión. La gravedad de la multicolinealidad dependerá del objetivo que se busque con el modelo. Si lo que pretendemos es predecir los valores de la variable dependiente, entonces el problema no es grave, pero sí lo es cuando se quiere determinar el efecto de cada variable independiente sobre la dependiente.

El término multicolinealidad se atribuyó, de forma original, a la existencia de una relación lineal “perfecta” o exacta entre algunas o todas las variables explicativas de un modelo de regresión. Estrictamente hablando, la multicolinealidad se refiere a la existencia de más de una relación lineal exacta y colinealidad se refiere a la existencia de una sola relación lineal. Para la regresión con k variables que incluye las variables independientes $X_1, X_2, \dots, X_k$, se dice que existe una relación lineal exacta si se satisface la siguiente condición:

$$\lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 + \cdots + \lambda_k X_k = 0$$

donde $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$, son constantes tales que no todas ellas son simultáneamente iguales a cero (en la práctica, las posibilidades de obtener una muestra de valores en la cual las variables independientes estén relacionadas de esta forma, son ciertamente muy pequeñas).

Hoy en día, el término multicolinealidad se emplea en un sentido más amplio para incluir el caso en el cual hay X variables intercorrelacionadas pero no en forma

perfecta, de la siguiente manera (ante dos varibles independientes, la intercorrelación se pondera a través del coeficiente de correlación simple, pero en el caso de encontrarnos frente a más de dos variables independientes, la intercorrelación puede ponderarse por los coreficientes de correlación parcial):

$$\lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 + \cdots + \lambda_k X_k + \nu_i = 0$$

donde ν_i es un término de error estocástico.

Existen diversas fuentes de multicolinealidad (Montgomery y Peck, 1982):

1. El método de obtención de datos empleado.
2. Restricciones en el modelo o en la población objeto de muestreo.
3. Especificación del modelo.
4. Un modelo sobredeterminado (más variables independientes que número de observaciones).

¿Cuáles son los inconvenientes de la multicolinealidad?; Achen (1982), responde lo siguiente: los novatos se preocupan por el hecho de que sus variables independientes estén correlacionadas, el llamado problema de la multicolinealidad. Sin embargo, la multicolinealidad no viola los supuestos básicos de la regresión. El único efecto de la multicolinealidad tiene que ver con la dificultad de obtener los coeficientes estimados con errores estándar pequeños. Sin embargo, el mismo problema se nos presenta al contar con un número reducido de observaciones o al tener variables independientes con varianzas pequeñas (de hecho, a nivel teórico, los conceptos de multicolinealidad, número reducido de observaciones y varianzas pequeñas en las variables independientes, forman todos parte esencial del mismo problema).

La multicolinealidad es esencialmente un fenómeno (de regresión) muestral, en el sentido en que aun si las variables independientes X no están linealmente relacionadas en la población, pueden estarlo en la muestra particular disponible. En resumen, nuestra muestra puede no ser lo suficientemente “rica” para acomodar todas las variables X en el análisis.

Las consecuencias prácticas de la multicolinealidad, se pueden enumerar como siguen:

1. Los mínimos cuadrados estimados, presentan varianzas y covarianzas grandes, lo cual provoca que la estimación precisa se complique.
2. Debido a la consecuencia 1, los intervalos de confianza tienden a ser mucho más amplios.
3. También a causa de la consecuencia 1, el estadístico t de uno o más coeficientes de regresión tiende a ser estadísticamente no significativo.
4. Aún cuando el estadístico t de uno o más coeficientes sea estadísticamente no signifivativo, la medida global de bondad de ajuste (R^2), puede ser muy alta.
5. Los mínimos cuadrados estimados y sus errores estándar son sensibles a pequeños cambios en la información de partida.

La detección de la multicolinealidad debe de plantearse teniendo en cuenta las siguientes advertencias (Kmenta, 1997):

1. La multicolinealidad es un problema de grado y no de clase. La distinción importante no es entre la presencia y la ausencia de multicolinealidad, sino entre sus diferentes grados.
2. Puesto que la multicolinealidad se refiere a la condición de las variables explicativas que no son estocásticas por supuestos, ésta es una característica de la muestra y no de la población.

Se consideran a continuación algunas reglas prácticas a tener en cuenta en la detección de la multicolinealidad:

1. Observación de un coeficiente de correlación elevado pero pocos estadísticos t significativos.
2. Elevadas correlaciones entre parejas de variables independientes.
3. Examinar las correlaciones parciales.
4. Efectuar regresiones auxiliares.
5. Examinar los autovalores y los índices de condición.
6. Examinar los términos de inflación de la varianza.

Para corregir el problema de la multicolinealidad, López (1998) propone actuar en alguno de los siguientes sentidos:

- Eliminar variables predictoras, con lo que se reduce el número de parámetros a estimar.
- Incluir información externa a los datos originales.

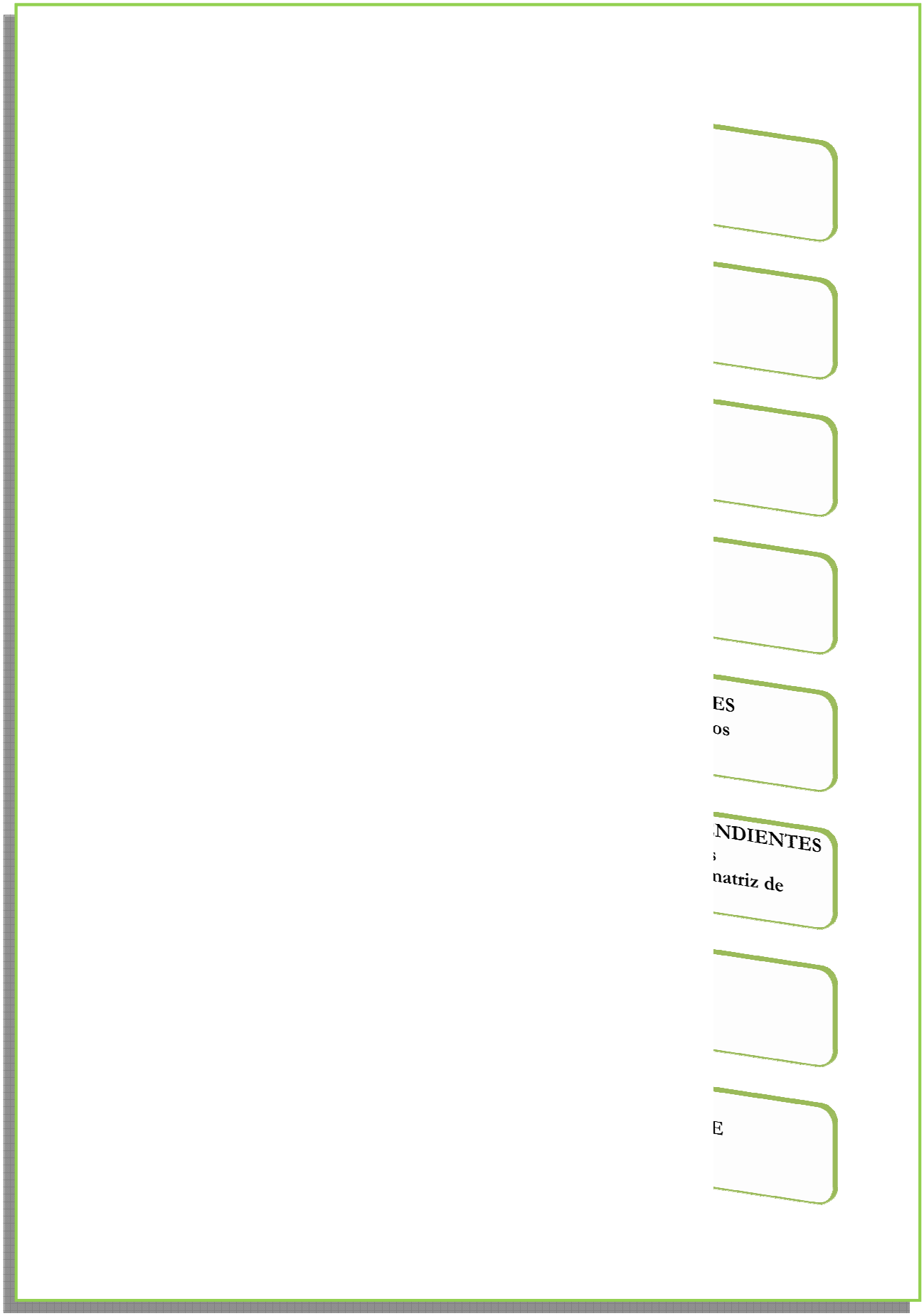
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CONCEPTUALIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE DATOS

Aunque la disponibilidad de nutrientes minerales es dependiente, de forma principal, tanto de las características minerales del suelo como de la naturaleza de la materia orgánica presente en el mismo, la absorción de nutrientes por parte de *Vitis vinífera* L., es dependiente de las características fisiológicas de la variedad y el portainjerto empleados. En comparación con otros cultivos, la vid presenta una demanda de nutrientes relativamente limitada (Olson y Kurtz, 1982); lo anterior, combinado con una considerable acumulación de nutrientes en las zonas leñosas, da lugar a que el asesoramiento nutricional en el cultivo de la vid se convierta en una tarea especialmente meticulosa.

Las analíticas de las concentraciones de los nutrientes minerales en los suelos objeto de cultivo, indican una biodisponibilidad potencial. Aunque el contenido de nutrientes minerales en estado potencialmente disponible para la vid, constituye una herramienta de diagnóstico nutricional que no debe de ser despreciada, la interpretación exclusiva de estos resultados para un asesoramiento nutricional, resulta escasa, y por tanto, inadecuada. La disponibilidad de nutrientes minerales, su absorción y acumulación en la planta de vid, varía de forma considerable a través del período anual de cultivo (Fregoni, 1985) y puede diferir de forma significativa entre variedades (Christensen, 1984). De esta forma, en una evaluación precisa del estado nutricional de las vides, se impone el análisis de tejidos vegetales de forma conjunta a la evaluación de parámetros edáficos, de tal forma que se pueda concretar con cierta precisión, las condiciones de absorción y acumulación de nutrientes por parte de la vid. Estos resultados obtenidos a través del análisis de tejidos, foliares principalmente, pueden entonces ser correlacionados con la biodisponibilidad de nutrientes en el suelo, con el objeto de intentar obtener conclusiones acerca de la interacción existente en el sistema suelo-planta a nivel nutricional.

En la búsqueda de las conclusiones anteriormente citadas, se empleará el apoyo de diversas técnicas de análisis estadístico, las cuales son reflejadas de forma esquemática, atendiendo a su orden de empleo, en la **figura nº16**. En primer lugar, se emplean técnicas descriptivas que nos permiten resumir el conjunto de datos, obteniendo una descripción de la estructura que presentan nuestras mediciones. A continuación, se ha procedido a realizar una búsqueda de las transformaciones matemáticas más adecuadas para aquellas variables en las cuales, a través de los estadísticos descriptivos, se observó una ausencia de ajuste a las condiciones de normalidad impuestas por los procedimientos paramétricos empleados de forma posterior. Una vez efectuado lo anterior, se desarrollan técnicas de análisis de componentes principales (ACP), de tal forma que nos agrupen las variables objeto de estudio, atendiendo a sus correlaciones, en un número determinado de componentes. Se observará con posterioridad las posibilidades de ejecución de análisis de correlación lineal entre las variables que han sido agrupadas en componentes de forma previa, con el objeto de evaluar el grado de asociación lineal entre los grupos de variables, no entendiéndolos como grupo predictor y grupo predicho, aunque en el diseño de la investigación se plantea la posibilidad de explicar algún grupo de variables a partir de otro, aunque estrictamente hablando, la correlación canónica es una técnica de tipo descriptiva, no explicativa.


ES
os
NDIENTES
natriz de
E

A partir de las puntuaciones factoriales obtenidas en los ACPs, se desarrollan matrices de correlación entre componentes, a partir de las cuales dilucidaremos las variables "nutrientes peciolo" a emplear como variables dependientes en una serie de análisis de regresión múltiple, con el objetivo de hallar una serie de modelos de predicción mediante la combinación lineal de predictores a través de la técnica de regresión "stepwise", procediéndose con posterioridad, y de forma final, a un análisis de fiabilidad de los modelos de predicción obtenidos.

4.2 DESCRIPTIVOS Y CONTRASTES DE NORMALIDAD

En el **cuadro nº 1**, se reflejan los estadísticos descriptivos y los contrastes de normalidad efectuados sobre las variables "parámetros edáficos"; es reseñable la no obtención de un valor crítico no significativo en el test de Kolmogorov-Smirnov para la variable Arena, aún efectuando sobre la misma diversas transformaciones. Sin embargo, observando su histograma de frecuencias y el gráfico Q-Q normal (**Anexo V**), se ha optado por considerar que la distribución de sus valores presenta una naturaleza normal.

	N	Media	SD	Sesgo	Curtosis	Sig. (K-S)
ARENA	120	48,40	6,28	,17	-,001	**+++**
ARCILLA	120	30,36	8,52	,52	-,55	**+**
pH	120	6,56	,66	,26	-,79	-
C.E.	120	,05	,03	1,89	3,57	**+++**
M.O.	120	,58	,14	,81	,84	-
P	120	12,00	11,02	1,89	3,41	**+++**
Ca	120	4,59	3,06	1,58	2,67	**+**
Mg	120	1,05	,61	,79	-,05	**+**
K	120	,35	,11	,29	-,42	-
Fe	120	47,33	45,82	1,62	2,12	**+++**
Mn	120	36,61	14,53	,38	,55	-
Cu	120	1,14	,59	,89	2,05	-
Zn	120	,52	,51	1,88	3,68	**++**
Al	120	,30	,46	3,07	12,82	**+++**

Parámetros edáficos de partida

+, Nivel de significación del 5 % (p<0,05) según test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov; ++, Nivel de significación del 1 % (p<0,01) según test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov; +++, Nivel de significación del 1 ‰ (p<0,001) según test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov

Con un guión, se indican aquellas variables en las cuales el contraste de normalidad no ha resultado significativo (p>0,05)

	N	Media	SD	Sesgo	Curtosis	Sig. (K-S)
ARENA	120	48,40	6,28	,17	-,001	**+++***
Lg_{10}ARCILLA	120	1,46	,12	,04	-,80	-
pH	120	6,56	,66	,26	-,79	-
Lg_{10}C.E.	120	-1,31	,22	,68	,02	-
M.O.	120	,58	,14	,81	,84	-
Lg_{10}P	120	,93	,35	,18	-,23	-
Lg_{10}Ca	120	,58	,26	,25	-,66	-
Lg_{10}Mg	120	-,05	,26	-,16	-,91	-
K	120	,35	,11	,29	-,42	-
Lg_{10}Fe	120	1,50	,38	,25	-,59	-
Mn	120	36,61	14,53	,38	,55	-
Cu	120	1,14	,59	,89	2,05	-
Lg_{10}Zn	120	-,46	,42	-,15	-,323	-
Lg_{10}Al	120	-1,03	,78	-,31	-,94	-

Parámetros edáficos empleados en la investigación

+, Nivel de significación del 5 % (p<0,05) según test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov; ++, Nivel de significación del 1 % (p<0,01) según test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov; +++, Nivel de significación del 1 ‰ (p<0,001) según test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov

Con un guión, se indican aquellas variables en las cuales el contraste de normalidad no ha resultado significativo (p>0,05)

*En base a la observación de los gráficos cuantil e histogramas (**Anexo V**)

Cuadro nº 1: Descriptivos de los parámetros edáficos de origen y de aquellos que finalmente han sido empleados en la investigación, alguno de los cuales han sido objeto de transformaciones matemáticas (se resalta en negrita), para poder ser sometidos a los procedimientos estadísticos paramétricos empleados a posteriori (la naturaleza de la transformación aparece descrita en la tabla correspondiente)

En el resto de variables edáficas, si se ha conseguido obtener valores críticos no significativos en el test, consiguiendo, en algunas de esas variables edáficas, tal circunstancia, mediante la transformación de las mismas (como ha sido el caso de las variables Lg_{10}Arcilla, Lg_{10}C. E. , Lg_{10}P, Lg_{10}Ca, Lg_{10}Mg, Lg_{10}Fe y Lg_{10}Zn).

En el **cuadro nº 2**, se reflejan los estadísticos descriptivos y los contrastes de normalidad efectuados sobre las Variables Limbo y Peciolo; se ha conseguido obtener valores críticos no significativos en el test para todas las variables objeto de estudio; en ninguna de estas variables, tal circunstancia, ha requerido la transformación de las mismas.

	N	Media	SD	Sesgo	Curtosis	Sig. (K-S)
P L	48	,11	,044	-,18	,04	-
Ca L	48	,57	,30	1,59	2,77	-
Mg L	48	,22	,048	,77	1,09	-
K L	48	1,18	,29	,28	1,43	-
Fe L	48	87,58	31,37	,63	,01	-
Mn L	48	186,53	94,27	,49	-,33	-
Zn L	48	33,76	13,03	,30	,67	-
Cu L	48	5,11	1,64	,21	-,39	-
B L	48	16,69	13,38	1,92	4,81	-

Parámetros nutricionales en limbos empleados en la investigación
Con un guión, se indican aquellas variables en las cuales el contraste de normalidad de Kolmogorov-Smirnov no ha resultado significativo (p>0,05)

	N	Media	SD	Sesgo	Curtosis	Sig. (K-S)
P P	48	,15	,072	,21	-,57	-
Ca P	48	,76	,28	,29	,83	-
Mg P	48	,44	,13	,30	-,22	-
K P	48	1,94	,58	,15	-,04	-
Fe P	48	35,28	10,38	1,85	4,61	-
Mn P	48	285,90	162,08	,21	-,95	-
Zn P	48	27,66	8,93	,78	,54	-
Cu P	48	4,02	1,68	,73	-,36	-
B P	48	14,80	11,47	1,77	3,78	-

Parámetros nutricionales en peciolos empleados en la investigación
Con un guión, se indican aquellas variables en las cuales el contraste de normalidad de Kolmogorov-Smirnov no ha resultado significativo (p>0,05)
Cuadro nº 2: Descriptivos de los parámetros nutricionales en limbo y peciolo; en ambos casos, los datos de origen y de aquellos que finalmente han sido empleados en la investigación, son los mismos, de tal forma que no ha sido necesario someterlos a transformaciones matemáticas para poder ser sometidos a los procedimientos estadísticos paramétricos empleados a posteriori

En el **cuadro nº 3**, se reflejan los estadísticos descriptivos y los contrastes de normalidad efectuados sobre las Variables Sarmiento Zona Basal, Media y Distal; se ha conseguido obtener valores críticos no significativos en el contraste de normalidad en todas las variables objeto de estudio, consiguiendo tal circunstancia en una de estas variables, mediante la transformación de la misma (nos referimos a la variable Lg_{10}B S B).

Tanto en los contrastes de normalidad efectuados sobre las Variables Sarmiento Zona Media, como en los contrastes de normalidad efectuados sobre las Variables Sarmiento Zona Distal, se ha conseguido obtener valores críticos no significativos en el test en todas las variables objeto de estudio, sin la necesidad de tener que realizar algún tipo de transformación de la variable.

En el **cuadro nº 4**, se reflejan los estadísticos descriptivos y los contrastes de normalidad efectuados sobre las Variables Sarmiento Global; en este conjunto de variables, se ha conseguido obtener valores críticos no significativos en el test de Kolmogorov-Smirnov, en todas las variables objeto de estudio, consiguiendo tal circunstancia en dos de estas variables, mediante la transformación de las mismas (variables $\mathrm{Lg_{10}Fe}$ y $\mathrm{Lg_{10}Cu}$).

	N	Media	SD	Sesgo	Curtosis	Sig. (K-S)
P S B	24	,05	,03	-,40	-,58	-
Ca S B	24	,31	,18	,69	-,05	-
Mg S B	24	,10	,03	-,01	1,29	-
K S B	24	,68	,10	,06	-,37	-
Fe S B	24	23,57	16,80	3,23	11,43	-
Mn S B	24	35,53	16,97	,54	,66	-
Zn S B	24	10,56	5,28	,78	1,35	-
Cu S B	24	5,55	2,94	3,19	12,62	-
B S B	24	10,99	12,29	2,10	4,51	**+**

Parámetros nutricionales en sarmientos zona basal de partida
Con un guión, se indican aquellas variables en las cuales el contraste de normalidad de Kolmogorov-Smirnov no ha resultado significativo (p>0,05)

	N	Media	SD	Sesgo	Curtosis	Sig. (K-S)
P S B	24	,05	,03	-,40	-,58	-
Ca S B	24	,31	,18	,69	-,05	-
Mg S B	24	,10	,03	-,01	1,29	-
K S B	24	,68	,10	,06	-,37	-
Fe S B	24	23,57	16,80	3,23	11,43	-
Mn S B	24	35,53	16,97	,54	,66	-
Zn S B	24	10,56	5,28	,78	1,35	-
Cu S B	24	5,55	2,94	3,19	12,62	-
$\mathrm{Lg_{10}}$B S B	24	,82	,46	-,08	-,31	-

Parámetros nutricionales en sarmientos zona basal empleados en la investigación
Con un guión, se indican aquellas variables en las cuales el contraste de normalidad de Kolmogorov-Smirnov no ha resultado significativo (p>0,05)

	N	Media	SD	Sesgo	Curtosis	Sig. (K-S)
P S M	24	,05	,02	,35	,34	-
Ca S M	24	,29	,17	,35	-,23	-
Mg S M	24	,10	,02	,66	,76	-
K S M	24	,67	,10	,28	-,84	-
Fe S M	24	17,49	7,45	,51	1,84	-
Mn S M	24	31,58	14,75	,67	,02	-
Zn S M	24	13,21	8,67	1,44	2,71	-
Cu S M	24	4,37	1,20	2,22	7,46	-
B S M	24	13,19	9,31	,63	-,44	-

Parámetros nutricionales en sarmientos zona media empleados en la investigación
Con un guión, se indican aquellas variables en las cuales el contraste de normalidad de Kolmogorov-Smirnov no ha resultado significativo (p>0,05)

	N	Media	SD	Sesgo	Curtosis	Sig. (K-S)
P S D	24	,06	,030	-,84	-,25	-
Ca S D	24	,33	,20	,55	-,17	-
Mg S D	24	,11	,021	,32	-,49	-
K S D	24	,75	,13	,29	-,94	-
Fe S D	24	24,80	13,67	2,32	7,29	-
Mn S D	24	36,35	16,93	,60	-,50	-
Zn S D	24	14,74	5,27	,79	,97	-
Cu S D	24	4,01	1,24	1,16	4,97	-
B S D	24	10,18	7,09	1,21	1,85	-

Parámetros nutricionales en sarmientos zona distal empleados en la investigación
Con un guión, se indican aquellas variables en las cuales el contraste de normalidad de Kolmogorov-Smirnov no ha resultado significativo (p>0,05)

Cuadro nº 3: Descriptivos de los parámetros en sarmientos "zona basal", "zona media" y "zona distal" de origen y de aquellos que finalmente han sido empleados en la investigación. Como se puede observar, únicamente el parámetro nutricional boro en "zona basal" ha sido objeto de transformación matemática (se resalta en negrita), para poder ser sometido a los procedimientos estadísticos paramétricos empleados a posteriori (la naturaleza de la transformación aparece descrita en la tabla correspondiente)

	N	Media	SD	Sesgo	Curtosis	Sig. (K-S)
P S	72	,06	,029	-,27	-,49	-
Ca S	72	,31	,18	,57	-,15	-
Mg S	72	,10	,022	,23	,50	-
K S	72	,70	,11	,42	-,32	-
Fe S	72	21,95	13,43	3,01	11,86	++
Mn S	72	34,49	16,15	,60	-,03	-
Zn S	72	12,84	6,74	1,22	2,85	-
Cu S	72	4,64	2,05	3,85	22,10	++
B S	72	11,45	9,74	1,61	3,28	-

Parámetros nutricionales en sarmientos sin división zonal de partida
Con un guión, se indican aquellas variables en las cuales el contraste de normalidad de Kolmogorov-Smirnov no ha resultado significativo (p>0,05); +, Nivel de significación del 5 % (p<0,05) según test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov; ++, Nivel de significación del 1 % (p<0,01) según test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov

	N	Media	SD	Sesgo	Curtosis	Sig. (K-S)
P S	72	,05	,03	-,27	-,49	-
Ca S	72	,31	,18	,57	-,15	-
Mg S	72	,10	,02	,23	,50	-
K S	72	,70	,12	,42	-,32	-
Lg_{10}Fe S	72	1,28	,21	,09	2,61	-
Mn S	72	34,49	16,15	,60	-,03	-
Zn S	72	12,84	6,74	1,22	2,85	-
Lg_{10}Cu S	72	,63	,15	,50	5,30	-
B S	72	11,45	9,74	1,61	3,28	-

Parámetros nutricionales en sarmientos sin división zonal empleados en la investigación
Con un guión, se indican aquellas variables en las cuales el contraste de normalidad de Kolmogorov-Smirnov no ha resultado significativo (p>0,05)

Cuadro nº 4: Descriptivos de los parámetros en sarmientos, sin atender a divisiones del propio sarmiento, de origen y de aquellos que finalmente han sido empleados en la investigación, alguno de los cuales han sido objeto de transformaciones matemáticas (se resalta en negrita), para poder ser sometido a los procedimientos estadísticos paramétricos empleados a posteriori (la naturaleza de la transformación aparece descrita en la tabla correspondiente)

4.3 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES. PARÁMETROS EDÁFICOS

4.3.1 KMO y prueba de esfericidad de Bartlett en parámetros edáficos

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		0,8
Bartlett's Test of Sphericity	**Approx. Chi-Square**	1099,294
	df	91
	Sig.	0,000

Tabla nº 7: KMO y test de Bartlett en ACP "parámetros edáficos"

A partir del valor observado en el estadístico KMO empleado como medida de la adecuación de nuestra población muestral (Kaiser, 1970), se concluye que el patrón de correlaciones no se muestra difuso, de tal forma que la suma de las correlaciones parciales, es suficientemente grande en comparación con la propia suma de las correlaciones entre variables (**Tabla nº 7**). Como consecuencia de lo anterior, se puede concluir que el número de componentes extraídos es confiable.

A partir del valor observado en la significación del test de Bartlett (**Tabla nº 7**), se puede concluir que la matriz de correlaciones no constituye una matriz identidad, de tal forma que nuestras variables objeto de estudio no son perfectamente independientes unas de otras. A partir de este test de Bartlett (o de esfericidad), se contrasta la hipótesis nula (H_0) de que la matriz de correlaciones es una matriz

identidad (incorrelación lineal entre las variables), de tal forma que si no pudiésemos rechazar H_0, siendo el tamaño muestral razonablemente grande, se debería de reconsiderar la realización de una Análisis de Componentes Principales (ACP).

4.3.2 Extracción de componentes en parámetros edáficos

A partir de la matriz de correlaciones entre las variables, obtendremos los componentes principales; cuando las variables originales presentan distintas unidades de medida, como es nuestro caso, conviene aplicar el análisis de la matriz de correlaciones o análisis normado. En el caso de que las variables presentasen las mismas unidades, se podría fundamentar el ACP en base a la matriz de covarianzas.

Incluimos el gráfico de sedimentación ("Scree Plot"), técnica preconizada por Cattell (1966b). En el eje X, se ubica el número de componentes, mientras que en el eje Y, se ubican sus autovalores ("Eigenvalues") asociados; de forma típica, aparecen unos pocos componentes con unos autovalores asociados relativamente grandes, mientras que un grupo más grande de componentes, se encuentran asociados a unos autovalores cuyos valores son relativamente pequeños, de tal forma que Cattell (1966b), recomienda establecer como número de factores a extraer, el punto de inflexión de la curva asociada al gráfico.

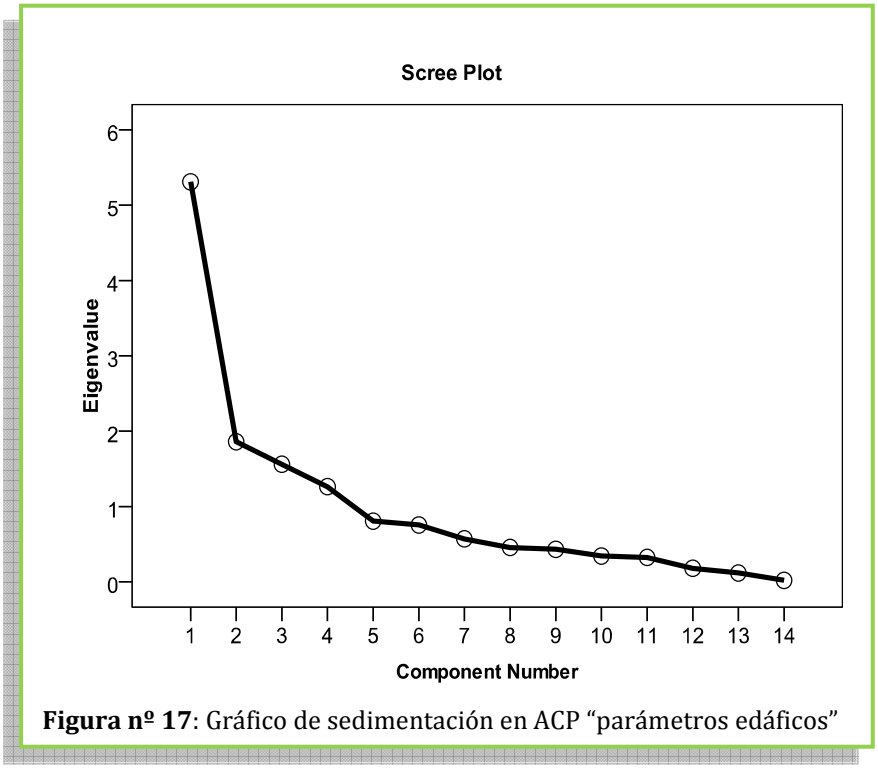


Figura nº 17: Gráfico de sedimentación en ACP "parámetros edáficos"

No obstante, Stevens (2002), indica que a partir de tamaños muestrales superiores a 200, el gráfico de sedimentación se presenta como un criterio razonablemente fiable, nosotros no optamos por establecer este gráfico como criterio de elección de los componentes a extraer, de tal forma que optamos por establecer el criterio de Kaiser (1960), el cual recomienda retener todos aquellos componentes cuyos autovalores sean superiores a 1 (un autovalor igual a 1 para un componente, es indicativo de que este componente solo puede explicar la misma varianza que una variable de forma individual (Hinton, 2004)).

A partir del gráfico de sedimentación, y para el caso de las variables suelo (**Figura nº 17**), se puede observar como a partir del 5^{o} componente, la pendiente ya no es muy acusada. No obstante, la decisión final acerca del número de componentes extraídos, se reflejará en el momento de mostrar las matrices de componentes rotados.

4.3.3 Matriz de componentes en parámetros edáficos

Una vez que los componentes han sido extraídos, es posible calcular que grado de carga (pesos) presentan las variables en dichos componentes, es decir, se realiza un cálculo de los coeficientes de correlación entre las variables y el componente al cual se encuentran asociadas. A estas correlaciones, se las denomina puntuaciones de las variables en los componentes (Factor Loadings). Con respecto a las puntuaciones, seguimos el criterio de Wang et al. (2005) (citados por Dance y Reidy, 2011), quienes abogan por mantener únicamente aquellas puntuaciones para las variables superiores a 0,4.

Estas puntuaciones de las variables, de forma previa a la rotación de los ejes de los componentes, nos ofrecen una idea acerca de la relación existente entre las variables y los componentes, la cual se puede clarificar a través del proceso de rotación de los componentes (no se modifican las relaciones, sino que simplemente se ofrece un poco más de luz a las mismas).

Las puntuaciones de las variables en los componentes no rotados, se indican en la tabla que recibe la denominación de “Component Matrix” (Matriz de los componentes).

Con el objeto de ayudar a la interpretación de la relación existente entre las variables y los componentes, los ejes de los componentes son rotados, en primer lugar de forma ortogonal a través del procedimiento “Varimax”. La rotación “Varimax”, nos asegura el hecho de mantener la independencia entre los componentes (es decir, que se encuentren incorrelados), de tal forma que con esta rotación ortogonal se maximizan las correlaciones elevadas y se minimizan aquellas cuyos valores sean inferiores.

Otra posibilidad de rotar los ejes de los componentes es a través de la rotación oblicua, de tal forma que en este tipo de rotación se permite que los componentes se encuentren correlacionados. En este caso hemos optado por emplear el procedimiento “Direct Oblimin” para la rotación oblicua, de tal forma que el grado en el cual se permite que los componentes se correlacionen, viene determinado por el valor de una constante que recibe el nombre de delta a la cual se le ha asignado el valor cero, de tal forma que se asegura que no se produzca una gran correlación entre los componentes.

La razón para la elección de un tipo u otro de rotación, se basa en la existencia de una razón teórica que haga suponer que los componentes deban de estar o no correlacionados. Pedhazur y Schmelkin (1991), sugieren que si la rotación oblicua revela una estructura de correlación entre componentes, la rotación ortogonal debe de ser descartada.

Cuando se lleva a cabo una rotación oblicua, la matriz de componentes se divide en dos matrices: “Pattern Matrix” (Matriz de configuración) y “Structure Matrix” (Matriz de estructura), las cuales, en el caso de una rotación ortogonal, son la misma.

La decisión de efectuar una rotación ortogonal u oblicua, ha sido tomada en base a la observación de la matriz denominada “Component Correlation Matrix” (Matriz de correlaciones entre los componentes), la cual se puede observar en el **Anexo VI**. Cuando se decida tener en cuenta la rotación oblicua, la interpretación de la misma, es llevada a cabo, al igual que un gran número de investigadores, tomando como base la matriz “Pattern Matrix”, aunque de la misma forma que recomiendan Graham et al. (2003), se reflejan tanto la matriz “Pattern Matrix” como la matriz “Structure Matrix”.

En el **Anexo VI**, se muestran la matriz de componentes no rotada, la matriz de componentes rotada por el método varimax, la matriz de estructura (saturaciones de la estructura rotada por el método oblimin directo) y la matriz de configuración (correlaciones de la estructura rotada por el método oblimin directo) de las variables edáficas. También se muestra la matriz de correlaciones entre los componentes, base maestra de la decisión de optar por la rotación ortogonal u oblicua.

Para el caso que nos atañe, variables suelo, nuestros criterios de trabajo planteados en el Análisis de Componentes Principales, nos definen cuatro componentes.

A partir de la observación de la “Component Correlation Matrix”, se opta por interpretar los resultados que se ofrecen a través de la rotación oblicua desechando la rotación ortogonal. A partir de esta rotación, se interpretan los componentes y las puntuaciones de las variables en los mismos, las cuales aparecen en la “Matriz de Componentes Rotada” (**Tabla nº 8**). Para una mejor visualización de los componentes, se ofrece una gráfica individualizada para cada uno de ellos, con objeto de facilitar su interpretación (**Figuras nº 18 y nº 19**).

De forma previa al análisis de la estructura de cada componente, debe de reseñarse, que a partir de la extracción de los cuatro componentes, el porcentaje de varianza explicado por los mismos, de forma previa a la rotación, es del 71,4% (el componente número 1 ofrece el mayor porcentaje de varianza explicado, siendo del 37,9%). Puesto que la rotación es de naturaleza oblicua, los componentes se encuentran correlacionados, no cumpliéndose la restricción de ortogonalidad entre los mismos, de tal forma que no se puede obtener una varianza total a partir de las sumas de las varianzas de los componentes.

Una vez ejecutada la extracción de componentes, se obtienen las comunalidades posteriores a la extracción, de tal forma que se refleja la proporción de varianza existente en cada variable que puede ser explicada por los componentes extraídos. Así, para el caso de las variables de naturaleza edáfica, a partir de los datos obtenidos de las comunalidades después de la extracción de componentes, es reseñable indicar que en las variables Arena y Arcilla, un 90,9% y un 89,6% respectivamente, de su varianza, se puede considerar común (aquella varianza que una variable en particular presenta en común con otras variables); dicho de otra forma, los componentes extraídos, explican un. 90,9% y un 89,6% de la varianza de las

variables Arena y Arcilla respectivamente. También reflejan una gran cantidad de varianza común las variables pH H_2O, Ca, Mg, Fe y Al.

A partir de la matriz de correlaciones reproducidas (**Anexo VI**), se obtienen los coeficientes de correlación entre las variables una vez efectuado el ACP que pretendemos como modelo. A partir de la sustracción de los mismos a los coeficientes de correlación observados inicialmente, se obtienen los denominados "residuales". Un buen modelo, presenta un máximo de un 50% de valores residuales superiores a 0,05 (Field, 2009). En nuestro caso, el ACP efectuado con las variables de naturaleza edáfica, nos proporciona un 45% de residuales superiores a 0,05, de tal forma que el ACP ofrece cierta fiabilidad.

Matriz de Componentes Rotada*				
	Componente			
	1	2	3	4
ARENA	-,080	**,970**	,026	-,057
pH H_2O 1:2,5	**-,695**	-,060	,170	**,404**
M.O.	-,030	-,114	**,785**	,120
K	-,015	,122	**,607**	-,305
Mn	**,808**	,001	,116	,223
Cu	**,701**	,062	**,434**	,250
Lg10ARCILLA	,102	**-,968**	-,009	,083
Lg10C.E.	**-,773**	,342	,115	,225
Lg10P	,205	**,496**	-,028	,181
Lg10Ca	**-,706**	-,300	,126	,204
Lg10Mg	**-,564**	**-,461**	,356	-,118
Lg10Fe	**,744**	,301	,046	-,023
Lg10Zn	,319	,390	**,421**	-,267
Lg10Al	,036	-,006	,098	**-,897**

Tabla nº 8: Matriz de componentes rotados ACP "parámetros edáficos"
*Rotación Oblicua

4.3.4 Discusión agronómica de los componentes extraídos en parámetros edáficos

El componente nº 1 (**Figura nº 18**) presenta la mayor combinación lineal de variables, encontrándose caracterizado por puntuaciones particularmente elevadas en los microelementos Fe, Cu y Mn, así como en la variable pH (con signo opuesto en la correlación con este componente nº 1 con respecto a los citados micronutrientes). También aparecen implicados en este componente nº 1, las variables Ca y Mg, con el mismo signo que la variable pH, así como la variable C.E., cuyo signo es el mismo que el de la variable pH.

Este componente nº 1, parece reflejar la influencia de la naturaleza de la "reacción del suelo" sobre la biodisponibilidad de los nutrientes minerales, de tal forma que parece indicarnos como la existencia de valores elevados en el pH junto con la de concentraciones crecientes en las variables Ca y Mg, se contrapone a la biodisponibilidad en el medio edáfico de las variables Fe, Cu y Mn.

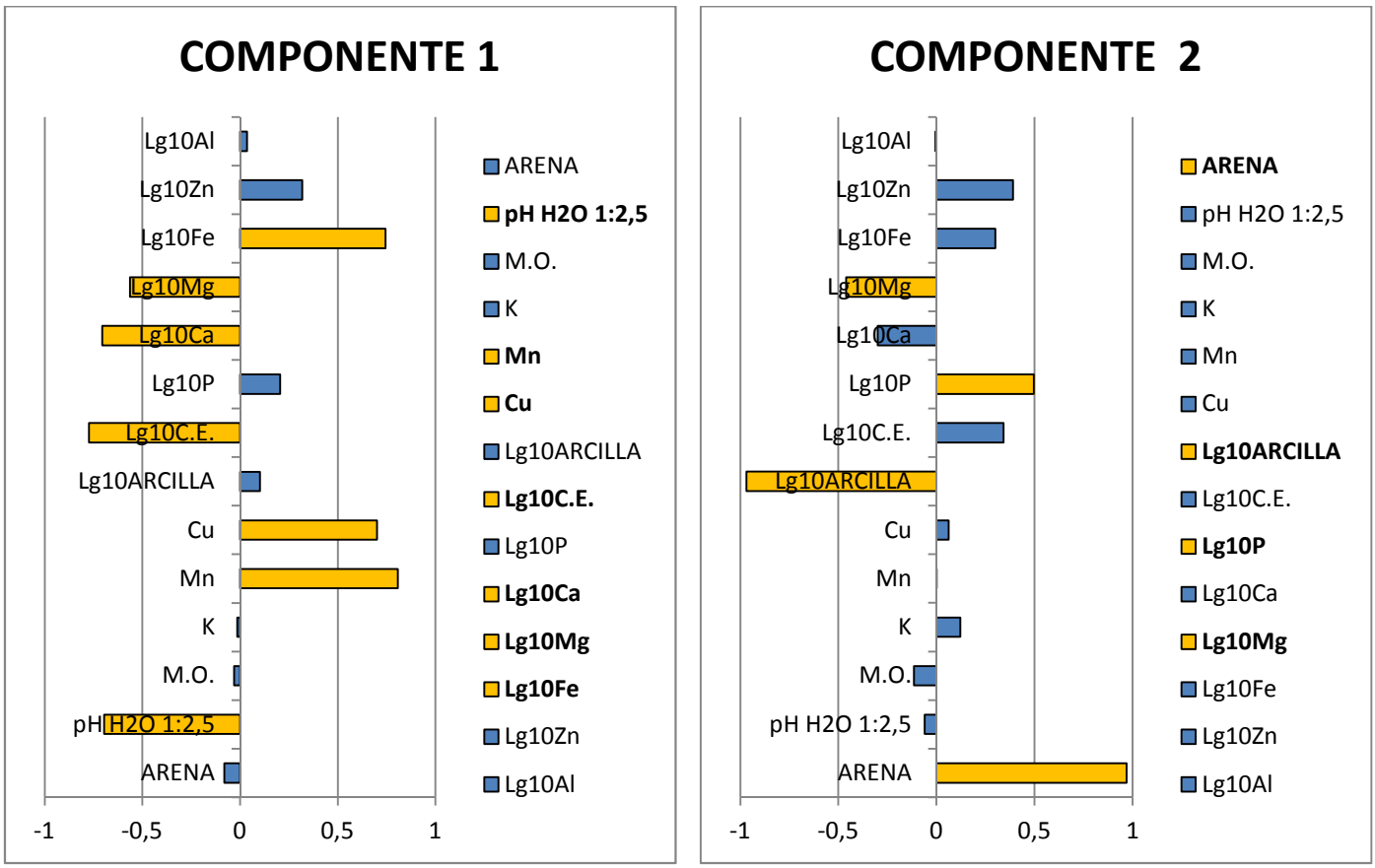


Figura nº 18: Puntuaciones de las variables en componentes 1 y 2 de ACP "parámetros edáficos"

Lo anterior, parece también deducirse también de la observación de la matriz de correlaciones (**Anexo VII**) del ACP efectuado sobre los parámetros edáficos. La forma en que las diversas variables edáficas se correlacionan con este componente, guarda similitudes con lo expresado por diversos autores. Así, Sumner et al. (1991), indican que la concentración de los cationes metálicos en la solución del suelo, se ve incrementada con un aumento en la acidez del suelo por dos razones:

1. Iones adsorbidos por el complejo de cambio, son liberados hacia la solución del suelo por intercambio con iones H_3O^+.
2. Los minerales del suelo son disueltos y liberan a la solución del suelo iones $Mn^{2+}, Fe^{2+}, Cu^{2+}, \ldots$

Acerca de las influencia que el pH del suelo ejerce sobre las concentraciones de los micronutrientes Fe, Cu y Mn, Tisdale et al. (1985) y Fageria et al. (1997a), indican lo siguiente: las actividades férricas (Fe^{3+}) y ferrosas (Fe^{2+}) en la solución del suelo disminuyen 1000 y 100 veces, respectivamente, por cada unidad creciente del pH del suelo; la solubilidad del Cu^{2+}es muy dependiente del pH del suelo y disminuye 100 veces por cada unidad creciente del pH; la principal especie iónica de Mn en el suelo es el Mn^{2+}, y sus concentraciones disminuyen 100 veces por cada unidad creciente de pH del suelo.

Así, los signos opuestos de las correlaciones con el componente nº 1 en la

variable pH y las variables Fe, Cu y Mn, encuentran acomodo en los términos en los que se expresan los autores citados en los párrafos anteriores.

La presencia del mismo signo en la correlación con el componente en la variable pH y las variables Ca y Mg, parece confirmar lo citado por Rengel (2002), al respecto de una menor disponibilidad de ambos nutrientes en la solución del suelo con el incremento de la acidificación del medio edáfico; es decir, las variables pH, Ca y Mg, parecen presentar una evolución similar en términos de incremento y descenso de las mismas.

Mayor complejidad reviste la explicación de la aparición conjunta de las variables $\mathrm{C.E._{1:2,5}}$ y $\mathrm{pH_{1:2,5}}$ en este componente nº 1. Marschner (1995), indica que el pH de los suelos salinos puede variar en un amplio rango, con una tendencia ligera a la alcalinidad; este mismo autor, indica como los suelos salino-sódicos (ESP>15), presentan valores elevados de pH. A partir de estas reflexiones de Marschner (1995), se puede pensar en una evolución conjunta de los parámetros $\mathrm{pH_{1:2,5}}$ y $\mathrm{C.E._{1:2,5}}$, lo cual guardaría relación con la aparición de ambas variables con signos idénticos en las correlaciones con el componente nº 1. Tan (1998), indica que aquellos suelos con elevadas cantidades de iones $\mathrm{Na^{+}}$, y por ende, con elevadas C.E., suelen encontrarse asociados a valores de pH elevado, el cual reduce la disponibilidad de una gran parte de los micronutrientes. En la misma línea que los autores anteriores, se manifiesta Bohn et al. (2001). Sin embargo, todo lo reflejado anteriormente, es referido para suelos con una C.E.≥4 dS/m, valores muy alejados de los determinados en nuestros suelos objeto de estudio, de tal manera que las conclusiones obtenidas por los autores anteriormente citados y las reflexiones que se puedan obtener a partir de nuestro ACP, pueden encontrarse conceptualmente distanciadas. Otra referencia a la relación existente entre el pH y la C.E., se fundamenta en las palabras de los investigadores Aitken y Moody (1991): la relación entre el $\mathrm{pH_{Ca}}$ (pH medido en $\mathrm{CaCl_2\ 0{,}01M}$) y el $\mathrm{pH_W}$ (pH medido en $\mathrm{H_2O}$) puede diferir en los suelos a consecuencia de la diferencia en la concentración de sales, o fuerza iónica, de la solución del suelo; hay un punto, denominado punto de efecto nulo salino, en el cual la fuerza iónica no presentará efecto sobre el pH del suelo. La medida de la fuerza iónica de un suelo, puede ser determinada a partir de la C.E. de una suspensión suelo/agua 1:5 y a través de la siguiente ecuación aportada por Griffin y Jurinack (1973):

$$\text{Fuerza iónica} = 0{,}013 \times \mathrm{C.E.}\ (^{\mathrm{dS}}/_{\mathrm{cm}})$$

El componente nº 2 (**Figura nº 18**), parece hacer referencia a la naturaleza física del suelo, siendo las variables arena y arcilla las que presentan puntuaciones particularmente elevadas, siendo ambas de signo opuesto. Por la puntuación positiva y elevada que presenta la variable arena, se podría concluir que este componente parece reflejar las condiciones de las clases texturales gruesas, de tal forma que la variable arcilla, predominante en las clases texturales finas, se contrapone de forma clara a la variable arena (en la matriz de correlaciones del ACP (**Anexo VII**), ambas variables presentan una correlación de naturaleza negativa muy elevada). En dicho componente nº 2, también aparecen las variables P y Mg, aunque con puntuaciones mucho más modestas. El hecho de que la variable arcilla y la variable P presenten signos opuestos en la correlación con el componente, puede encontrar fundamento en el hecho de que la cantidad de $\mathrm{P_{orgánico}}$ en suelos con textura fina (arcillosa) se ve incrementada; el $\mathrm{P_{orgánico}}$ es retenido por las arcillas, protegiéndolo del proceso de

mineralización, disminuyendo por lo tanto, los niveles de $P_{lábil}$ del suelo (Juárez y Sánchez, 1996). A partir de lo anterior, es razonable comprender que P y arcilla presenten signos opuestos en sus correlaciones con el componente nº 2, mientras que en el caso de P y arena, estas correlaciones presentan el mismo signo. La diferencia de signos en las correlaciones de arena y Mg con el componente, parecen presentar lógica, pues en aquellos suelos donde predomina la fracción textural arena, el catión Mg^{2+}es lavado con facilidad, de tal forma que su concentración disminuye. El hecho de que las variables arcilla y Mg presenten correlaciones con el componente con signos de idéntica naturaleza, puede hallar explicación en las palabras de Navarro y Navarro (2003): el Mg en los suelos, se encuentra como constituyente de numerosos minerales, mayoritariamente silicatos; a partir de la descomposición de estos minerales, el Mg pasa en parte al estado de sales solubles. Sin embargo, frente a lo anterior, también cabe decir que la presencia de determinados minerales silicatados, particularmente las arcillas de tipo 2×1, provocan la retención del Mg^{2+} en la estructura mineral de las mismas, aumentando así la fracción no intercambiable del Mg.

El componente nº 3 (**Figura nº 19**), podría denominarse como componente "orgánico", siendo la variable M.O., la que presenta una mayor puntuación en este componente; junto a ella, y con el mismo signo, aparecen las variables Zn, Cu y K, aunque con puntuaciones más moderadas, participando a su vez la variable Cu en el componente nº 1.

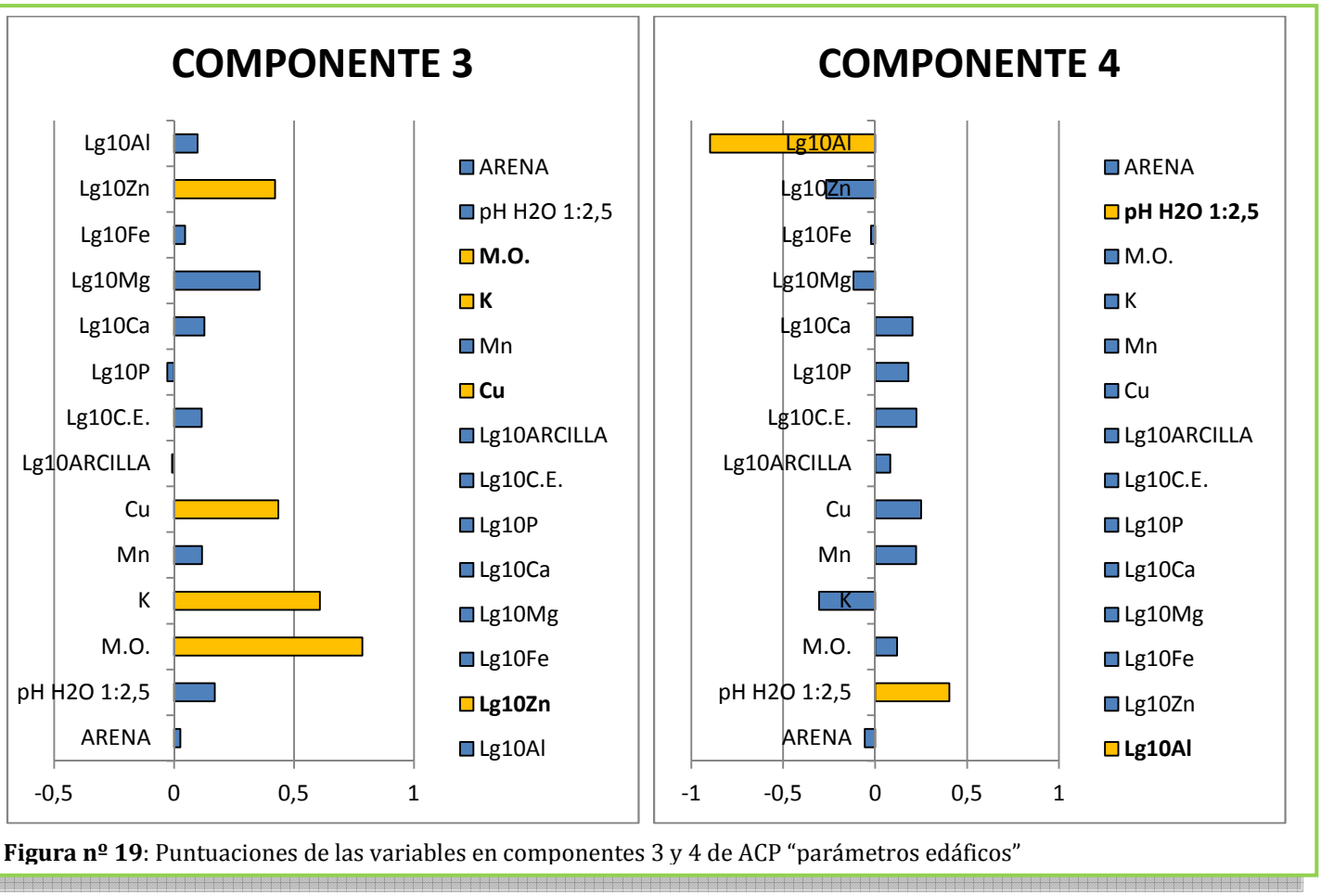


Figura nº 19: Puntuaciones de las variables en componentes 3 y 4 de ACP "parámetros edáficos"

La M.O. del suelo, parece afectar a la disponibilidad del Zn, de tal forma que se incrementa la solubilidad de este microelemento a través de la formación de complejos con ácidos orgánicos, aminoácidos o ácidos fúlvicos, y también a través de una disminución de la inmovilización microbiana (Marschner, 1995). No obstante, este mismo autor, alerta del hecho de que la M.O. también puede formar complejos órgano-metálicos con el Zn, que disminuyen la solubilidad del mismo. Respecto al Cu, Marschner (1995) advierte del hecho de que la solubilidad del Cu en el suelo disminuye de forma habitual por la complejación con compuestos de la materia orgánica presente en el suelo, indicando que tal complejación entre la M.O. y el Cu, acontece a valores de pH en la solución del suelo > 6,5. La similitud en las puntuaciones que presentan las variables Cu y Zn en este componente "orgánico", podrían hallar respuesta en lo siguiente; Gamble (1986), ofrece el siguiente orden en la afinidad de los metales por los ácidos húmicos a pH 3,7

$$\mathrm{Hg} > Fe > Pb > Cr > \mathbf{Cu} > \mathbf{Zn} > Cd > Mn > Co$$

Por su parte, Schnitzer y Kerndorff (1981), establecen el siguiente orden de afinidad de los iónes metálicos para formar compuestos insolubles a través de la formación de complejos con ácidos fúlvicos

$$\mathrm{Fe} = \mathrm{Cr} = \mathrm{Al} > Pb = \mathbf{Cu} > Hg > \mathbf{Zn} = \mathrm{Ni} = \mathrm{Co} = \mathrm{Cd} = \mathrm{Mn}$$

Es decir, el Cu muestra una mayor afinidad orgánica que el Zn; a este respecto, Glustoker et al. (1977), realizaron la misma distinción entre ambos microelementos. Lo anterior también queda de manifiesto a través del siguiente orden propuesto por Schnitzer y Skinner (1967) y Mengel et al. (2001) para la afinidad de cationes divalentes con la materia orgánica presente en el suelo

$$\mathbf{Cu} > Ni > Pb > Co > Ca > \mathbf{Zn} > Mn > Mg$$

Cheng (1977), indica que un elevado contenido de M.O. en el suelo presenta una influencia compleja sobre el comportamiento de los micronutrientes (y a tenor, tanto de las puntuaciones moderadas de Cu, Zn y K en este componente, como de las débiles correlaciones existentes entre los anteriores nutrientes y la materia orgánica (Anexo VII), este autor parece adivinar ciertos interrogantes acerca de la solidez de este componente nº 3); este autor, sobre experiencias en histosoles, observó síntomas de deficiencia en Cu y Zn en plantas cultivadas, atribuyendo el origen de las mismas a una fuerte retención de Cu y Zn por parte de ácidos húmicos insolubles.

La quelación de cationes, es un factor importante tanto en la formación de los suelos, como en el proceso de suministro de nutrientes a las plantas. La solubilidad de los metales complejados, depende tanto de la fuerza del vínculo entre la parte orgánica y la parte metálica, como de la movilidad del complejo formado, la cual viene determinada principalmente por el tamaño del grupo orgánico involucrado. La unión de un metal a una molécula orgánica de bajo peso molecular, incrementará de forma apreciable su movilidad en el suelo (Andersson, 1977b).

Cuando uno de los componentes consta de dos variables, como es el caso del componente nº 4 (**Figura nº 19**), entonces el hecho de que esta circunstancia se muestre como confiable, es función del patrón de correlaciones acaecido entre ambas

variables y con el resto de variables incluidas en la matriz de correlaciones (Tabachnick y Fidell, 2007). Así pues, siguiendo las recomendaciones de los anteriores autores, y a partir de la información presente en la matriz de correlaciones del ACP, el componente nº 4 no ofrece fiabilidad; sin embargo, si resulta lógico desde el punto de vista de la naturaleza química de los suelos, pudiéndose denominar este componente como "acidez del suelo", de tal forma que ambas variables (pH y Al), atendiendo a los signos de sus correlaciones con el componente nº 4, se contraponen. El papel que juega el Al sobre la acidez del suelo, puede ponerse de manifiesto a través de la siguiente explicación ofrecida por Tan (1998):

El proceso de hidrólisis del Al^{3+} desemboca en la expresión

$$Al^{3+} + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3H^+$$

Aplicando la ley de acción de masas

$$K_h = {(H^+)^3}/{(Al^{3+})}$$

Donde K_h es la constante de hidrólisis; tomando logaritmos, operando y sustituyendo p por –log, obtenemos la expresión

$$pH = {1}/{3}\, pK_h + {1}/{3}\, Al^{3+}$$

Esta ecuación, recibe el nombre de potencial de aluminio, y muestra la relación existente entre el pH y la actividad del Al en los suelos, de tal forma que el grado de cambio del pH en los suelo es, de acuerdo a lo anterior, dependiente de la concentración de aluminio expresada en términos de potencial de aluminio.

Particularizando los efectos que la toxicidad por Al presenta sobre el desarrollo de la vid, debe de indicarse de forma previa, que no ha sido una cuestión ampliamente documentada, habiéndose constatado, sin embargo, de forma consistente, una reducción de las producciones y un pobre desarrollo de la planta. En viñedos viejos, se ha observado como el sistema radicular se ve limitado en su desarrollo, de forma abrupta, cuando los valores de pH descienden a niveles donde los valores de concentración por Al comienzan a ser relativamente importantes.

Meyer *et al.* (1984), estudiaron los efectos que causaba el Al sobre el híbrido US Ramsey X99 Ritcher Nº 10, añadiendo en la solución test 10 µg/g Al mediante la utilización de $AlK(SO_4)_2 12H_2O$. Aquellas plantas que se desarrollaban en las soluciones en las cuales el Al había sido añadido, mostraron un marcado retraso en el desarrollo comparándolas con aquellas plantas empleadas como control. Estas plantas mostraron también un engrosamiento de las raíces en su zona terminal, así como un escaso desarrollo de raíces secundarias. Las hojas de estas plantas, comenzaron a mostrar síntomas cloróticos, apareciendo en primer lugar en los bordes, continuando su desarrollo hacia el interior del limbo, transformándose estas zonas cloróticas a lo largo del desarrollo de la planta en zonas necrosadas. En estas plantas, se observaron asimismo reducción en las dimensiones, y de forma consecuente, en las masas de los órganos vegetativos permanentes de la parte

aérea.

Estos autores, mostraron disminuciones en las concentraciones de Ca y Mg en las hojas como consecuencia de la adición de Al; de forma inversa, esta adición de Al, provocó incrementos en las concentraciones de K, P y S en las hojas.

La concentración en los tallos, siguió el mismo patrón mencionado anteriormente para las hojas, pero en el caso del Ca, la diferencia entre las plantas tratadas con Al y las plantas control, fue menos marcada.

En las raíces, la concentración de Al en el grupo de plantas tratadas fue extremadamente elevada en comparación con las plantas control; por consiguiente, lo anterior muestra que el sistema radicular no solamente actúa como canal de transporte, sino que también realiza una cierta selección de nutrientes, reteniendo gran parte del Al absorbido por la planta cuando este está presente en concentraciones perjudiciales para el desarrollo vegetal. De forma inversa, la retención de Mg en el grupo de vides que recibieron tratamiento, fue reducida en gran medida.

Esta relación contrapuesta entre el pH y la concentración de Al^{3+}, ha sido recientemente expuesta por Garzón et al. (2011); estos investigadores, a través de un ensayo realizado sobre lixiviados de suelos ácidos de viñedo clasificados como “Tipic Palexerult” (Soil Survey Staff, 2003), constataron cómo se producía un incremento exponencial en las concentraciones de Al^{3+} a partir de valores de pH en lixiviados inferiores a 4,5.

A partir de la observación de la “Component Correlation Matrix” (**Anexo VI**), se observa una correlación moderada entre los componentes nº 1 y nº 2, de tal forma que nos indica la existencia de vínculos entre la componente que hemos denominado “reacción del suelo”, con la componente referida como “clase textural”. No obstante, y ya que tanto el valor observado en el estadístico KMO, como en la significación del test de Bartlett son muy adecuados, se procede a realizar a continuación un análisis de correlación canónica entre el grupo de variables más representativas, desde un punto de vista conceptual, del componente “reacción del suelo” (pH y bases de cambio) y otro grupo conformado por aquellas variables cuyas puntuaciones en los componentes las definan con una mayor representatividad.

4.3.5 Análisis de correlación canónica en parámetros edáficos

A partir de las varianzas explicadas por los variados canónicos

$$P_W = \sum_{i=1}^{n} \frac{c_i^2}{n}$$

y los valores de estos variados, obtenemos las redundancias de los variados canónicos

$$R_{Vi/Wi} = P_W \times \lambda_i$$

que nos conducirá a la redundancia total

$$\sum R_{Vi/Wi}$$

es decir, la suma de las redundancias del conjunto de variables sobre las cuales se desea obtener el porcentaje de varianza explicada.

Mediante la utilización de las variables Arena, Lg_{10}Arcilla, M. O. y Lg_{10}Al como variables independientes (**Cuadro nº 5**), la varianza explicada sobre la componente "reacción del suelo" (que hemos definido por su pH H_2O (suelo:agua – 1:2,5) y las concentraciones de las bases de cambio Ca y Mg)es del 34,8%.

ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DIMENSIONAL			
VARIADOS CANÓNICOS	**F**	**Sig. (F)**	**VALOR**
1	8,17	**+++**	0,425
2	8,31	**+++**	0,344
3	6,05	**+++**	0,105

+, Nivel de significación del 5 % (p<0,05); ++, Nivel de significación del 1 % (p<0,01); +++, Nivel de significación del 1 ‰ (p<0,001); - Nivel de significación >0,05

CARGAS CANÓNICAS			
VARIABLE	**DIMENSIÓN CANÓNICA 1**	**DIMENSIÓN CANÓNICA 2**	**DIMENSIÓN CANÓNICA 3**
pH H_2O	-,040	,883	,468
Lg_{10} Ca	-,423	,879	-,220
Lg_{10} Mg	-,869	,483	,110

Análisis de correlación canónica; pH H_2O, Lg_{10} Ca y Lg_{10} Mg Vs. Arena, Lg_{10} Arcilla, M. O. y Lg_{10} Al

ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DIMENSIONAL			
VARIADOS CANÓNICOS	**F**	**Sig. (F)**	**VALOR**
1	6,111	**+++**	,397
2	3,122	**+++**	,111
3	,009	-	,00008

+, Nivel de significación del 5 % (p<0,05); ++, Nivel de significación del 1 % (p<0,01); +++, Nivel de significación del 1 ‰ (p<0,001); - Nivel de significación >0,05

CARGAS CANÓNICAS			
VARIABLE	**DIMENSIÓN CANÓNICA 1**	**DIMENSIÓN CANÓNICA 2**	**DIMENSIÓN CANÓNICA 3**
pH H_2O	-,519	,242	-,820
Lg_{10} Ca	-,831	-,362	-,098
Lg_{10} Mg	-,993	,115	,382

Análisis de correlación canónica; pH H_2O, Lg_{10} Ca y Lg_{10} Mg Vs. Arena, Lg_{10} Arcilla y M. O.

ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DIMENSIONAL			
VARIADOS CANÓNICOS	**F**	**Sig. (F)**	**VALOR**
1	6,32	**+++**	,321
2	1,55	-	,027

+, Nivel de significación del 5 % (p<0,05); ++, Nivel de significación del 1 % (p<0,01); +++, Nivel de significación del 1 ‰ (p<0,001); - Nivel de significación >0,05

CARGAS CANÓNICAS		
VARIABLE	**DIMENSIÓN CANÓNICA 1**	**DIMENSIÓN CANÓNICA 2**
pH H_2O	-,435	,415
Lg_{10} Ca	-,900	-,098
Lg_{10} Mg	-,922	,382

Análisis de correlación canónica; pH H_2O, Lg_{10} Ca y Lg_{10} Mg Vs. Arena y Lg_{10} Arcilla

Cuadro nº5: Análisis de correlación canónica en parámetros edáficos

Si utilizamos como variables independientes Arena, Lg_{10}Arcilla y M. O. (**Cuadro nº 5**), a partir de las varianzas explicadas por los variados canónicos y las redundancias de los variados canónicos, la varianza ahora explicada es del 26,5%.

Sin embargo, utilizando como variables independientes Arena y Lg_{10}Arcilla (**Cuadro nº 5**), a partir de las varianzas explicadas por los variados canónicos y las redundancias de los variados canónicos, la varianza ahora explicada es del 19,8%.

Observando los resultados anteriores, se puede concluir que la principal influencia ejercida sobre la componente "reacción del suelo" viene definida por el componente estructural (cuyas variables de mayor influencia eran Arena y Arcilla); en un orden de influencia decreciente aparecería a continuación la concentración de Al^{3+}, y por último, los porcentajes de M O. existentes en el medio. Todo lo anterior, nos lleva a pensar que en caso de tener que actuar frente a condiciones de acidez limitantes para el desarrollo de *Vitis vinífera* L. cv. Prieto Picudo en los suelos objeto de estudio, el principal mecanismo de actuación iría encaminado a una modificación de las concentraciones de Al^{3+} presentes en el suelo (previsiblemente mediante programas de encalado), puesto que su influencia es mayor que la de los niveles de M. O. existentes en el medio de cultivo, todo ello, naturalmente, sometido a la premisa de no modificación del componente estructural.

4.4 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES. NUTRIENTES LIMBO

4.4.1 KMO y prueba de esfericidad de Bartlett en nutrientes limbo

A partir del valor observado en el estadístico KMO empleado como medida en la adecuación de nuestra población muestral (Kaiser, 1970), se concluye que el patrón de correlaciones se muestra difuso, de tal forma que la suma de las correlaciones parciales, no es suficientemente grande en comparación con la propia suma de las correlaciones entre variables (**Tabla nº 9**). Como consecuencia de lo anterior, se puede concluir que el número de componentes extraídos debe de tomarse con reservas, de tal forma que lo recomendable sería hacer acopio de un mayor número de muestras de limbos con el objeto de que el ACP fuese más confiable.

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		0,4
Bartlett's Test of Sphericity	**Approx. Chi-Square**	103,019
	df	36
	Sig.	0,000

Tabla nº 9: KMO y test de Bartlett en ACP "nutrientes limbo"

A partir del valor observado en la significación del test de Bartlett (**Tabla nº 9**), se puede concluir que la matriz de correlaciones no constituye una matriz identidad, de tal forma que nuestras variables objeto de estudio no son perfectamente independientes unas de otras (no se presenta incorrelación lineal entre las variables).

4.4.2 Extracción de componentes en nutrientes limbo

A partir del gráfico de sedimentación, y para el caso de las variables nutrientes limbo (**Figura nº 20**), se puede observar como a partir del 3^{er} componente, la pendiente ya no es muy acusada.

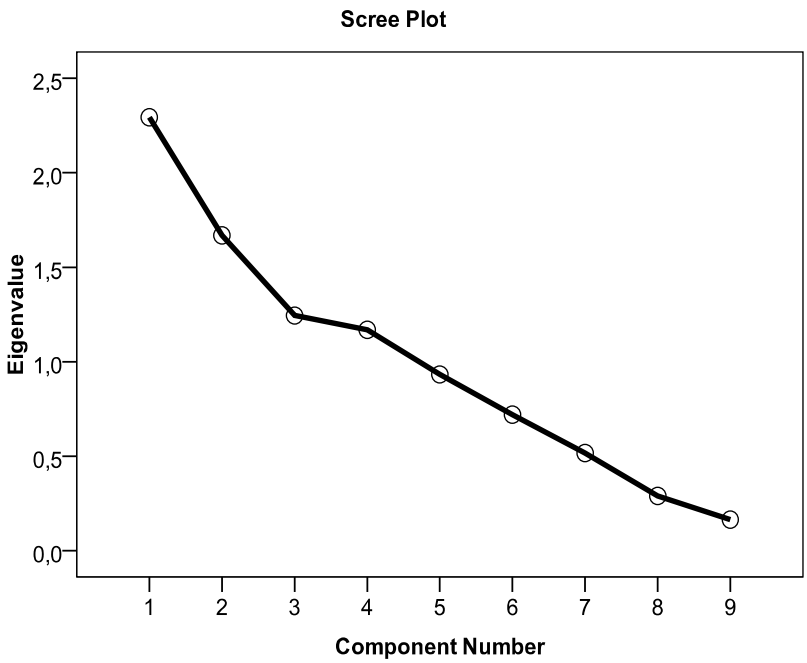


Figura nº 20: Gráfico de sedimentación en ACP "nutrientes limbo"

No obstante, la decisión final acerca del número de componentes extraídos, se reflejará en el momento de mostrar las matrices de componentes rotados (de forma especial en esta ocasión, se observa con claridad, la subjetividad que supondría el tomar la decisión acerca del número de componentes a extraer, tomando como base el gráfico de sedimentación).

4.4.3 Matriz de componentes en nutrientes limbo

Para el caso que nos atañe, variables nutrientes limbo, nuestros criterios de trabajo planteados en el Análisis de Componentes Principales, nos definen cuatro componentes.

A partir de la observación de la "Component Correlation Matrix" (**Anexo VI**), se opta por interpretar los resultados que se ofrecen a través de la rotación ortogonal. A partir de esta rotación, se interpretan los componentes y las puntuaciones de las variables en los mismos, las cuales aparecen en la "Matriz de Componentes Rotada" (**Tabla nº 10**). Para una mejor visualización de los componentes, se ofrece una gráfica individualizada para cada uno de ellos, con objeto de facilitar su interpretación (**Figuras nº 21 y nº 22**).

El porcentaje de varianza explicado por los componentes es del 70,85% (el componente número 1 ofrece el mayor porcentaje de varianza explicado, siendo del 21,57% después de efectuar la rotación ortogonal).

En el caso de las variables nutrientes limbo, a partir de los datos obtenidos de las comunalidades después de la extracción de componentes, es reseñable indicar que en las variables Fe L y Mn L, un 82,0% y un 81,3% respectivamente, de su

varianza, se puede considerar común. También reflejan una gran cantidad de varianza común las variables P L, K L y Cu L.

A partir de la matriz de correlaciones reproducidas, podemos deducir que el ACP efectuado con las variables nutrientes limbo, nos proporciona un 83% de residuales superiores a 0,05, de tal forma que la confiabilidad del ACP, nos debe de ofrecer motivos de preocupación.

Matriz de Componentes Rotada*				
	Componente			
	1	2	3	4
P L	**-,818**	,186	-,083	,267
Ca L	,165	,035	**,749**	,155
Mg L	-,182	-,242	**,746**	,019
K L	**,532**	**,569**	-,236	,358
Fe L	,156	**,686**	**,481**	-,305
Mn L	**,824**	,329	-,051	,152
Zn L	**,457**	-,220	,140	**,454**
Cu L	-,107	**,802**	-,261	,078
B L	-,064	,076	,095	**,825**

Tabla nº 10: Matriz de componentes rotados ACP "nutrientes limbo"
*Rotación Ortogonal

4.4.4 Discusión agronómica de los componentes extraídos en nutrientes limbo

En el componente nº 1 (**Figura nº 21**), es reseñable valorar la presencia de una estrecha relación con el mismo de las variables P L y Mn L.

Por otra parte, las variables K L y Zn L, presentan puntuaciones moderadas en este componente, y además, estas mismas variables aparecen con puntuaciones moderadas en otros componentes, con lo cual alimentan la confusión en la interpretación.

No obstante, en el caso de la interacción P L y Zn L, debe de indicarse que tanto Sumner y Farina (1986), como Wilkinson et al. (2000), han puesto en evidencia la existencia de una interacción de tipo antagónico entre ambos nutrientes; a través de la observación de la matriz de correlaciones del ACP efectuado sobre las variables "nutrientes limbo" (Anexo VII), se confirma la existencia de una interacción antagónica, sin embargo, los valores de esa correlación en nuestro estudio (Anexo VII), son muy moderados, de tal forma de tal forma que la presencia de Zn L en el componente nº 1, ha de ser tenida en cuenta con cautela.

En el caso reseñado de la presencia conjunta de P L y K L en este componente nº 1, al hecho ya citado de que K L se presente con puntuaciones moderadas en más de un componente, debe de añadirse la circunstancia de que las fuentes bibliográficas consultadas, citan la interacción entre ambos nutrientes como sinérgica (Dibb y Thompson, 1985; Fageria et al., 1997a, 1997b), de tal forma que el hecho de que ambos nutrientes se presenten en este componente con puntuaciones de signo

opuesto (junto a la circunstancia de que la correlación entre ambas variables en la matriz de correlaciones de nuestro ACP (Anexo VII), resulta ser negativa), añade más oscuridad a la presencia del nutriente K L en este componente nº 1.

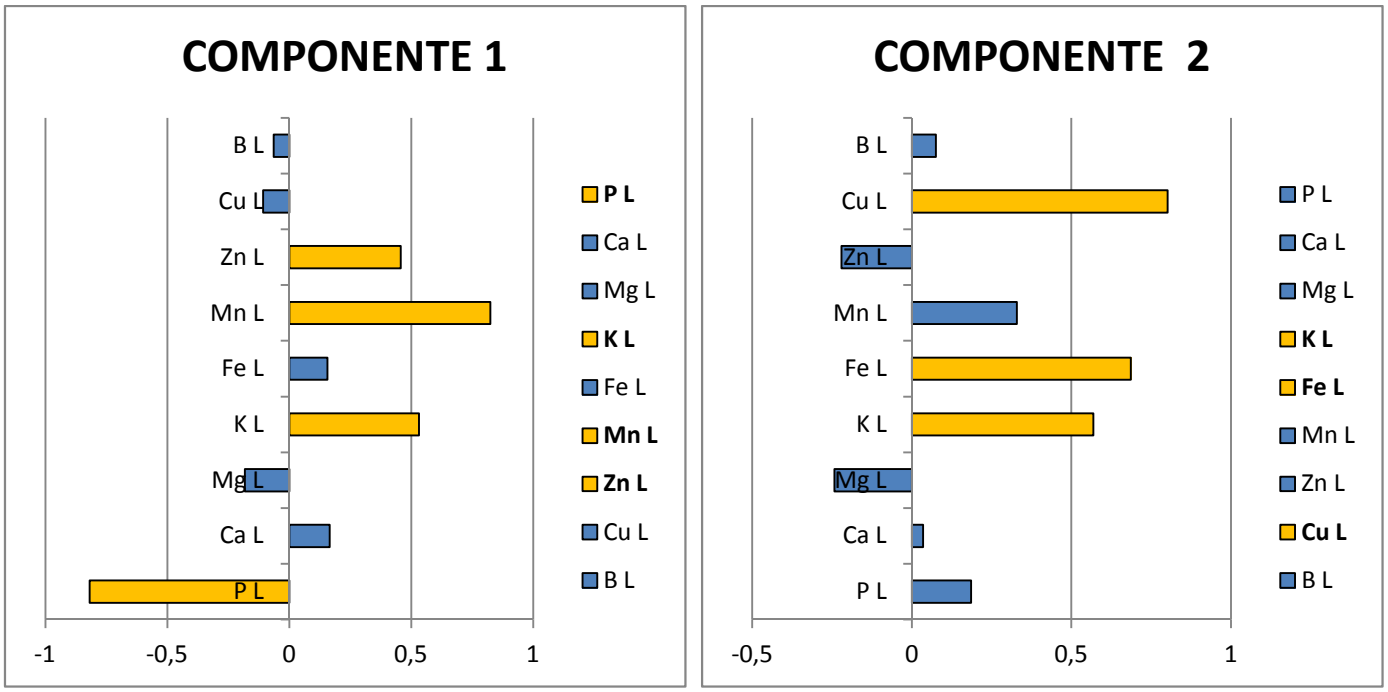


Figura nº 21: Puntuaciones de las variables en componentes 1 y 2 de ACP "nutrientes limbo"

Así pues, este componente nº 1 depende principalmente de las variables P L y Mn L, y la presencia de signos opuestos indica una contraposición de ambas variables en la naturaleza de este componente nº 1, de tal forma que la presencia de elevadas concentraciones en limbo de una de estas variables se contrapone a la presencia de la otra para la manifestación de este componente, de tal forma que induce a pensar en una evolución opuesta de ambos nutrientes en limbo. Este hecho parece confirmarse a través de la matriz de correlaciones de nuestro ACP (Anexo VII), el cual nos ofrece una correlación negativa y moderada entre P L y Mn L, aspecto este último ya citado por Foy (1984).

En el componente nº 2 (**Figura nº 21**), es reseñable valorar la presencia de una estrecha relación con el mismo de la variable Cu L. Mientras tanto, las variables K L y Fe L, presentan puntuaciones moderadas en este componente, y además, estas mismas variables aparecen con puntuaciones moderadas en otros componentes, de tal forma que la generación de conclusiones a partir de este componente supone un atrevimiento desmedido. Sin embargo, es reseñable citar que en la matriz de correlaciones del ACP efectuado (Anexo VII), la correlación entre las variables Cu L y K L resulta ser positiva y moderada; respecto a este efecto sinérgico anterior, el mismo ya ha sido notificado por Fageria (2002a), así como por Dibb y Thompson (1985).

El componente nº 3 (**Figura nº 22**), muestra una dependencia moderadamente elevada de las variables Ca L y Mg L; en este mismo componente aparece la variable Fe L con una puntuación moderada; y además de no presentar una estrecha relación

con el componente nº 3, también presenta una puntuación moderada en el componente nº 2, de tal forma que su presencia en ambos componentes no facilita la interpretación.

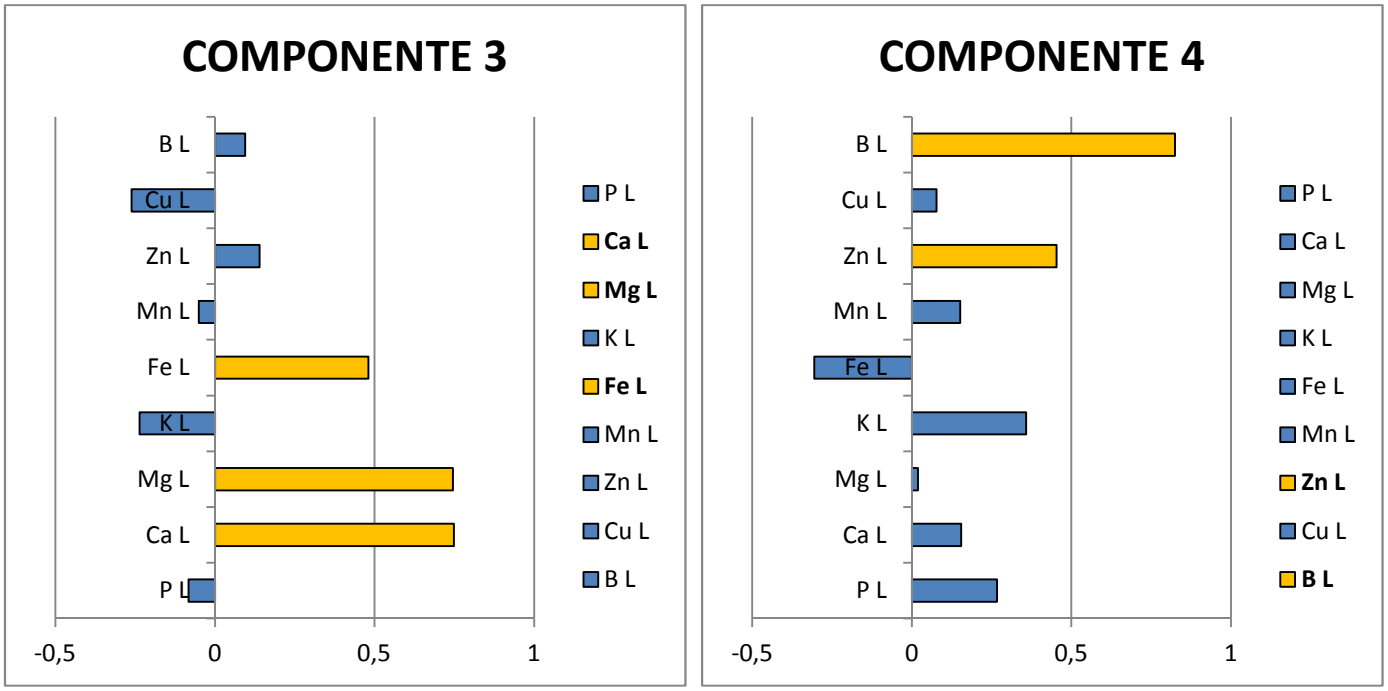


Figura nº 22: Puntuaciones de las variables en componentes 3 y 4 de ACP "nutrientes limbo"

Así pues, este componente nº 3 depende principalmente de las variables Ca L y Mg L, y la presencia de signos idénticos, puede indicarnos que la evolución de las concentraciones en limbo de ambas variables han de mostrar un patrón de comportamiento similar (hecho que parece confirmarse a través de la matriz de correlaciones del ACP (Anexo VII), aunque el coeficiente de correlación entre ambos nutrientes es moderadamente bajo). A este respecto, Moore et al. (1961), Maas y Ogata (1971), Fageria (1983) y Schwartz y Bar-Yosef (1983), han observado como un incremento de la absorción de Ca^{2+} por parte de las especies vegetales y el consecuente incremento de Ca en sus tejidos, lleva aparejado una disminución de las concentraciones de Mg en los tejidos vegetales.

Atendiendo a la recomendación ofrecida por Tabachnick y Fidell (2007), en aquellos casos en que los componentes presenten únicamente dos variables, se observará el patrón de correlaciones acaecido entre ambas variables y con el resto de variables incluidas en la matriz de correlaciones. A partir de lo anterior, se concluye que el componente nº 4 (**Figura nº 22**) no ofrece fiabilidad, descartando la interpretación del mismo.

4.5 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES. NUTRIENTES PECIOLO

4.5.1 KMO y prueba de esfericidad de Bartlett en nutrientes peciolo

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		0,6
Bartlett's Test of Sphericity	**Approx. Chi-Square**	98,669
	df	36
	Sig.	0,000

Tabla nº 11: KMO y test de Bartlett en ACP "nutrientes peciolo"

A partir del valor observado en el estadístico KMO empleado como medida en la adecuación de nuestra población muestral (Kaiser, 1970), se concluye que el patrón de correlaciones no se muestra difuso, de tal forma que la suma de las correlaciones parciales, es suficientemente grande en comparación con la propia suma de las correlaciones entre variables (**Tabla nº 11**). Como consecuencia de lo anterior, se puede concluir que el número de componentes extraídos es confiable.

A partir del valor observado en la significación del test de Bartlett (**Tabla nº 11**), se puede concluir que la matriz de correlaciones no constituye una matriz identidad, de tal forma que nuestras variables objeto de estudio no son perfectamente independientes unas de otras.

4.5.2 Extracción de componentes en nutrientes peciolo

A partir del gráfico de sedimentación, y para el caso de las variables nutrientes peciolo (**Figura nº 23**), se puede observar como a partir del 5^o componente, la pendiente ya no es muy acusada. No obstante, la decisión final acerca del número de componentes extraídos, se reflejará en el momento de mostrar las matrices de componentes rotados (de nuevo, se observa con claridad, la subjetividad que supondría el tomar la decisión acerca del número de componentes a extraer, tomando como base el gráfico de sedimentación).

Para el caso que nos atañe, variables nutrientes peciolo, nuestros criterios de trabajo planteados en el Análisis de Componentes Principales, nos definen cuatro componentes.

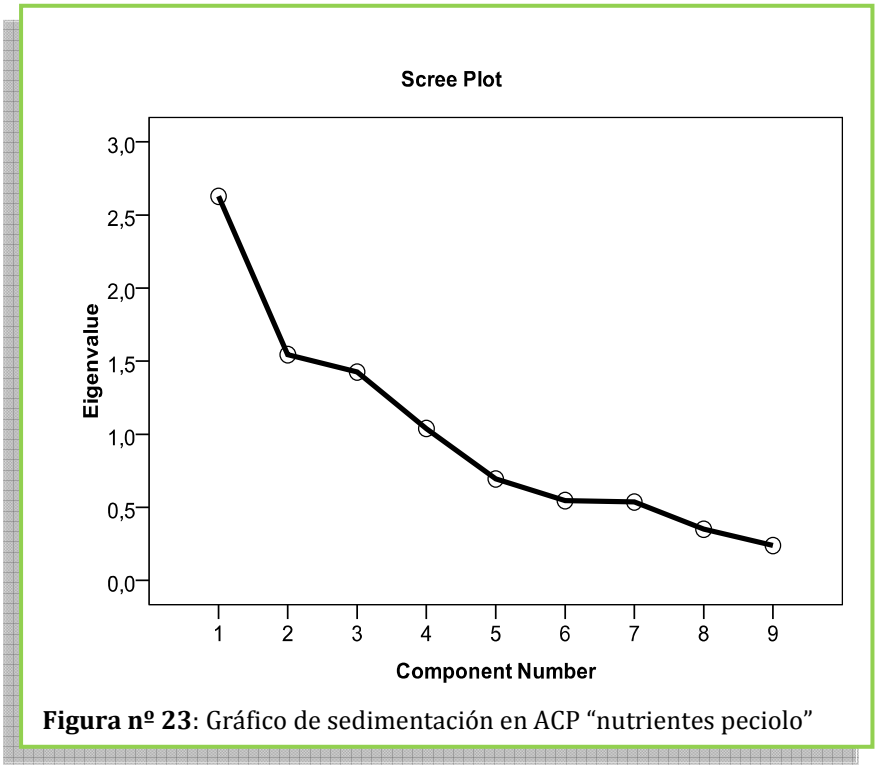


Figura nº 23: Gráfico de sedimentación en ACP "nutrientes peciolo"

4.5.3 Matriz de componentes en nutrientes peciolo

A partir de la observación de la "Component Correlation Matrix" (**Anexo VI**), se opta por interpretar los resultados que se ofrecen a través de la rotación ortogonal. A partir de esta rotación, se interpretan los componentes y las puntuaciones de las variables en los mismos, las cuales aparecen en la "Matriz de Componentes Rotada" (**Tabla nº 12**). Para una mejor visualización de los componentes, se ofrece una gráfica individualizada para cada uno de ellos, con objeto de facilitar su interpretación (**Figuras nº 24 y nº 25**).

El porcentaje de varianza explicado por los componentes es del 73,74% (el componente número 1 ofrece el mayor porcentaje de varianza explicado, siendo del 26,31% después de efectuar la rotación ortogonal).

Matriz de Componentes Rotada*				
	Componente			
	1	2	3	4
P P	,008	,015	,028	**,924**
Ca P	**,680**	,141	,097	-,359
Mg P	**,851**	-,082	,146	,157
K P	-,073	**,865**	,038	,294
Fe P	-,031	-,120	**,917**	,039
Mn P	,067	**,754**	-,060	**-,405**
Zn P	**,637**	,100	**,447**	,216
Cu P	**-,826**	,007	,138	,084
B P	,290	**,423**	**,550**	-,086

Tabla nº 12: Matriz de componentes rotados ACP "nutrientes peciolo"
*Rotación Ortogonal

En el caso de las variables nutrientes peciolo, a partir de los datos obtenidos de las comunalidades después de la extracción de componentes, es reseñable indicar que en las variables P P, K P y Fe P, un 85,5%, un 84,2% y un 85,7% respectivamente, de su varianza, se puede considerar común. También reflejan una gran cantidad de varianza común las variables Mg P y Mn P

A partir de la matriz de correlaciones reproducidas, podemos deducir que el ACP efectuado con las variables nutrientes peciolo, nos proporciona un 63% de residuales superiores a 0,05, de tal forma que la confiabilidad del ACP, nos debe de ofrecer ciertos motivos de preocupación.

4.5.4 Discusión agronómica de los componentes extraídos en nutrientes peciolo

El componente nº 1 (**Figura nº 24**), muestra una dependencia elevada de las variables Mg P y Cu P, y moderadamente elevada de la variable Ca P. En este mismo componente aparece la variable Zn P con una puntuación moderada; y además de no presentar una estrecha relación con el componente nº 1, también presenta una puntuación moderada en el componente nº 3, de tal forma que su presencia en ambos componentes no facilita la interpretación.

Es reseñable, que de igual forma que en el componente nº 3 del Análisis de Componentes Principales efectuado en las variables "Nutrientes Limbo", las variables Ca P y Mg P aparecen en un mismo componente y con signos idénticos, lo cual hace pensar en un patrón de comportamiento similar; la novedad en este caso, es que en este componente nº 1 aparece ahora con una puntuación elevada la variable Cu P, con un signo opuesto a las variables Ca P y Mg P, lo cual nos hace pensar en una contraposición entre variables, de tal forma que se pueden predecir patrones de comportamiento opuestos entre Ca P/Mg P y Cu P. Lo anterior, se confirma a través de la observación de la matriz de correlaciones del ACP (Anexo VII), donde se pueden apreciar correlaciones negativas moderadas entre dichos nutrientes; en esta misma línea, se ha manifestado Fageria (2002a) y Toselli et al. (2009).

El componente nº 2 (**Figura nº 24**), muestra una dependencia elevada de las variables K P y Mn P; en este mismo componente aparece la variable B P con una puntuación moderada; y además de no presentar una estrecha relación con el componente nº 2, también presenta una puntuación moderada en el componente nº 3 de tal forma que su presencia en ambos componentes no facilita la interpretación.

En la matriz de correlaciones del ACP (**Anexo VII**), se puede observar como los nutrientes K y Mn se correlacionan de forma positiva, aunque esta correlación alcanza un valor moderadamente bajo; en esta misma línea de interacción entre ambos nutrientes, se manifestaron Dibb y Thompson (1985), publicando como el K^+ beneficiaba la absorción de Mn^{2+}, cuando este último elemento se encontraba en concentraciones deficientes en el medio de cultivo.

En el componente nº 3 (**Figura nº 25**), la variable Fe P aparece con puntuaciones elevadas; las variables Zn P y B P, se presentan en este mismo componente, pero con puntuaciones más moderadas, pero su presencia simultánea en otros componentes del ACP, provoca una mayor dificultad en una posible interpretación de lo acontecido en este componente.

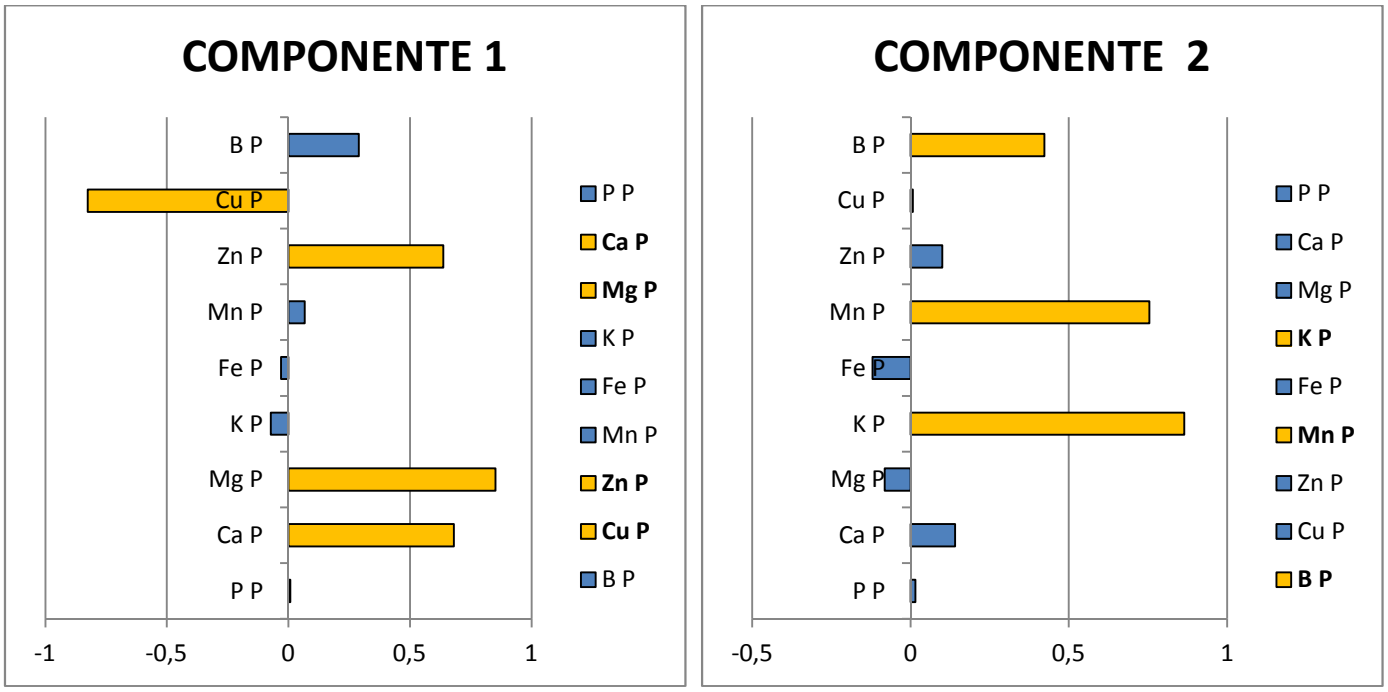


Figura nº 24: Puntuaciones de las variables en componentes 1 y 2 de ACP "nutrientes peciolo"

A partir de lo anterior, se podría concluir que el componente nº 4 no ofrece fiabilidad, descartando la interpretación del mismo. Sin embargo, el hecho de que de la misma forma que en el ACP efectuado sobre las variables "Nutrientes Limbos", se produzca la aparición conjunta en un componente de las variables P P y Mn P con signos opuestos, da consistencia a la idea de la existencia de un patrón de contraposición entre ambas variables (de igual modo que en limbos), de tal forma que la presencia de elevadas concentraciones en peciolos de una de estas variables se contrapone a la presencia de la otra.

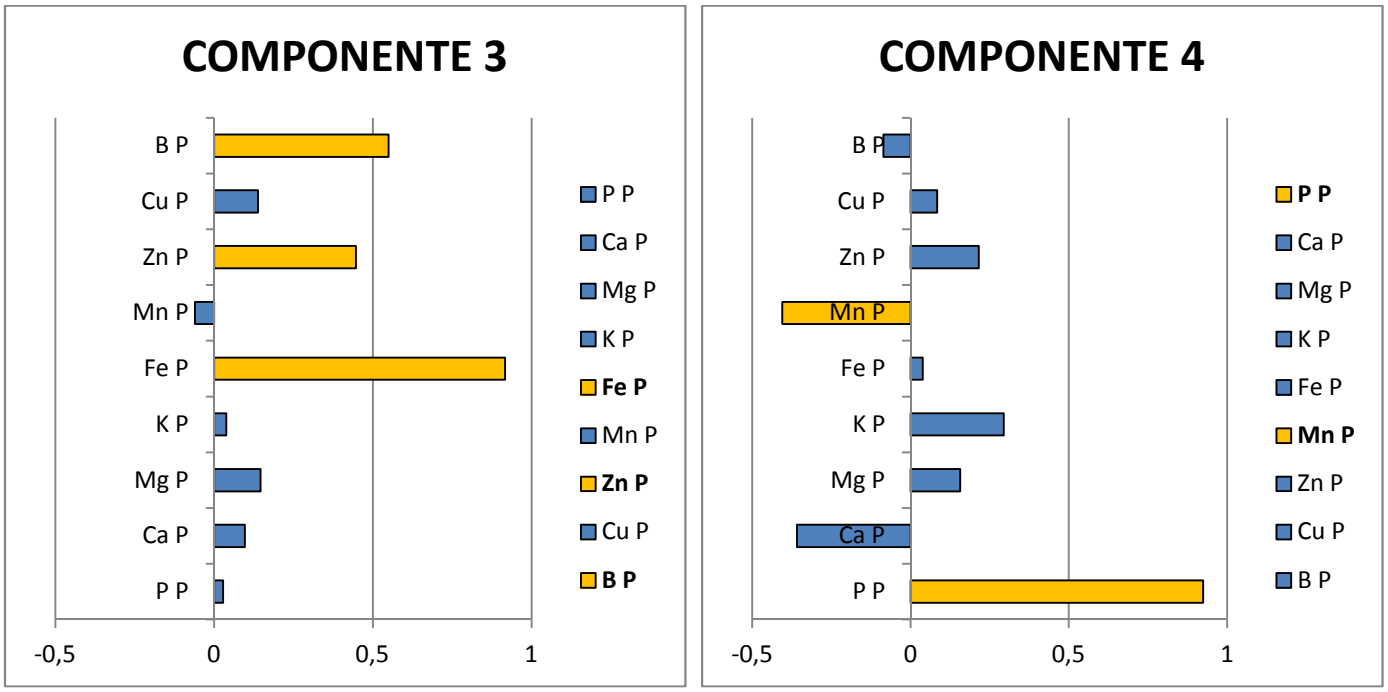


Figura nº 25: Puntuaciones de las variables en componentes 3 y 4 de ACP "nutrientes peciolo"

4.6 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES. NUTRIENTES SARMIENTOS

4.6.1 KMO y pruebas de esfericidad de Bartlett en nutrientes sarmientos

Como se puede observar en el **cuadro nº 6**, a partir del valor observado en el estadístico KMO empleado como medida en la adecuación de nuestra población muestral (Kaiser, 1970), en el caso de las poblaciones muestrales de sarmientos "Zona Basal, Zona Media y Global" se concluye que el patrón de correlaciones no se muestra difuso, de tal forma que la suma de las correlaciones parciales, es suficientemente grande en comparación con la propia suma de las correlaciones entre variables. Como consecuencia de lo anterior, se puede concluir que el número de componentes extraídos es confiable. Sin embargo, en la población muestral de sarmientos "Zona Distal", se concluye que el patrón de correlaciones se muestra difuso, de tal forma que la suma de las correlaciones parciales, no es suficientemente grande en comparación con la propia suma de las correlaciones entre variables. Como consecuencia de lo anterior, se puede concluir que el número de componentes extraídos debe de tomarse con reservas, de tal forma que lo recomendable sería

hacer acopio de un mayor número de muestras de sarmientos “Zona Distal” con el objeto de que el ACP ofreciese una mayor confianza.

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		0,5
Bartlett's Test of Sphericity	**Approx. Chi-Square**	88,014
	df	36
	Sig.	0,000
Sarmientos “Zona Basal”		
Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		0,5
Bartlett's Test of Sphericity	**Approx. Chi-Square**	48,645
	df	36
	Sig.	0,08
Sarmientos “Zona Media”		
Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		0,4
Bartlett's Test of Sphericity	**Approx. Chi-Square**	71,408
	df	36
	Sig.	0,000
Sarmientos “Zona Distal”		
Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		0,5
Bartlett's Test of Sphericity	**Approx. Chi-Square**	156,498
	df	36
	Sig.	0,000
Sarmientos “Global”		

Cuadro nº 6: KMO y test de Bartlett en ACPs “nutrientes sarmientos”

A partir del valor observado en la significación del test de Bartlett, se puede concluir que la matriz de correlaciones no constituye una matriz identidad en el caso de las poblaciones muestrales de sarmientos “Zona Basal, Zona Distal y Global”, de tal forma que nuestras variables objeto de estudio no son perfectamente independientes unas de otras. Sin embargo, a partir del valor observado en la significación del test de Bartlett en la población muestral “Zona Media”, no se puede concluir que la matriz de correlaciones no constituye una matriz identidad, de tal forma que se debería de reconsiderar la realización de una Análisis de Componentes Principales (ACP) mientras el tamaño muestral en “Sarmientos Zona Media” no se vea incrementado.

4.6.2 Extracción de componentes en nutrientes sarmientos

A partir de los gráficos de sedimentación para las diferentes zonas en que se han divido las variables “nutrientes sarmientos” (**Figura nº 26**), se puede intuir lo siguiente: para el caso de las variables nutrientes sarmientos “Zona Basal”, se puede observar como a partir del 5^{o} componente, la pendiente ya no es muy acusada. Análogamente, para los casos de las variables nutrientes sarmientos “Zona Media”, “Zona Distal” y “Global”, se puede observar como a partir del 3^{er}, 4^{o} y 3^{er}

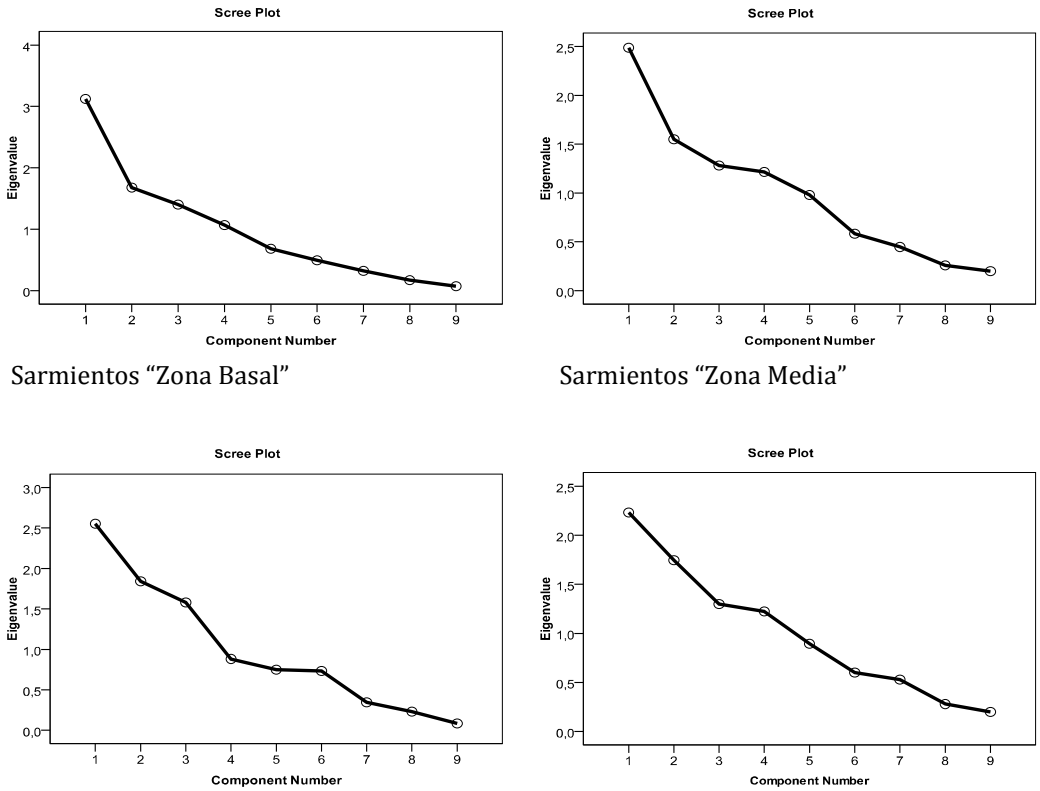
componente, la pendiente ya no es muy acusada. No obstante, la decisión final acerca del número de componentes extraídos, se reflejará en el momento de mostrar las matrices de componentes.

4.6.3 Matrices de componentes en nutrientes sarmientos

Para el caso variables nutrientes sarmientos “Zona Basal”, nuestros criterios de trabajo planteados en el Análisis de Componentes Principales, nos definen cuatro componentes; análogamente, para “Zona Media”, “Distal” y “Global”, se extraen cuatro, tres y cuatro componentes, respectivamente.

A partir de la observación de las distintas “Component Correlation Matrix” (**Anexo VI**), se opta por interpretar los resultados que se ofrecen a través de la rotación ortogonal en los diferentes grupos muestrales de sarmientos. A partir de esta rotación, se interpretan los componentes y las puntuaciones de las variables en los mismos, las cuales aparecen en la correspondiente “Matriz de Componentes Rotados” (**Cuadro nº 7**).

El porcentaje de varianza explicado por los componentes es del 80,76%, 72,59%, 66,39% y 72,22% para las variables nutrientes sarmientos “Zona Basal”, “Media”, “Distal” y “Global” respectivamente (el componente número 1 ofrece el mayor porcentaje de varianza explicado en los cuatro ACP, siendo del 25,75%, 22,12%, 27,22% y 21,41% respectivamente, después de efectuar la rotación ortogonal).



Sarmientos “Zona Basal” Sarmientos “Zona Media”

Sarmientos “Zona Distal” Sarmientos “Global”

Figura nº 26: Gráficos de sedimentación en ACPs “nutrientes sarmientos”

En el caso de las variables nutrientes sarmientos zona basal, a partir de los datos obtenidos de las comunalidades después de la extracción de componentes, es reseñable indicar que en las variables K B, Fe B y Mn B, un 91,0%, un 90,7% y un 87,0% respectivamente, de su varianza, se puede considerar común. También reflejan una gran cantidad de varianza común las variables Ca B, Mg B, Cu B y B B.

A partir de la matriz de correlaciones reproducidas, podemos deducir que el ACP efectuado con las variables nutrientes sarmientos zona basal, nos proporciona un 47% de residuales superiores a 0,05, de tal forma que la confiabilidad del ACP, puede considerarse aceptable.

En el caso de las variables nutrientes sarmientos zona media, a partir de los datos obtenidos de las comunalidades después de la extracción de componentes, es reseñable indicar que en las variables Fe M y Mn M, un 89,5%, y un 89,1% respectivamente, de su varianza, se puede considerar común. También reflejan una gran cantidad de varianza común las variables P M, Mg M, y B M.

A partir de la matriz de correlaciones reproducidas, podemos deducir que el ACP efectuado con las variables nutrientes sarmientos zona media, nos proporciona un 52% de residuales superiores a 0,05, de tal forma que la confiabilidad del ACP, puede considerarse aceptable.

En el caso de las variables nutrientes sarmientos zona distal, a partir de los datos obtenidos de las comunalidades después de la extracción de componentes, es reseñable indicar que en las variables K D y Ca D, un 84,2%, y un 83,2% respectivamente, de su varianza, se puede considerar común.

A partir de la matriz de correlaciones reproducidas, podemos deducir que el ACP efectuado con las variables nutrientes sarmientos zona distal, nos proporciona un 86% de residuales superiores a 0,05, de tal forma que la confiabilidad del ACP, debe de ofrecernos motivos de preocupación.

En el caso de las variables nutrientes sarmientos global, a partir de los datos obtenidos de las comunalidades después de la extracción de componentes, es reseñable indicar que en las variables Ca S y K S, un 86,0%, y un 82,0% respectivamente, de su varianza, se puede considerar común. También reflejan una gran cantidad de varianza común las variables Mg S y Mn S.

A partir de la matriz de correlaciones reproducidas, podemos deducir que el ACP efectuado con las variables nutrientes sarmientos global, nos proporciona un 86% de residuales superiores a 0,05, de tal forma que la confiabilidad del ACP, debe de ofrecernos motivos de preocupación.

4.6.4 Discusión agronómica de los componentes extraídos en nutrientes sarmientos

Antes de proceder a intentar desentrañar la información aportada por las matrices de componentes obtenidas en los diferentes ACP efectuados sobre las variables nutrientes en sarmientos, es necesario tener presente lo siguiente:

A través de los estadísticos KMO y test de esfericidad de Bartlett, los ACP efectuados sobre “Sarmientos Zona Basal” y “Sarmientos Global” se han mostrado como confiables, mientras que en los ACP efectuados sobre “Sarmientos Zona Media” y “Sarmientos Zona Distal”, hay que tomar con ciertas reservas la información aportada por los mismos.

Teniendo en cuenta lo anterior, así como las recomendaciones aportadas por Tabachnick y Fidell (2007) para aquellos casos en que los componentes presenten únicamente dos variables, se puede mostrar cierta confianza en las siguientes aseveraciones:

Por su presencia conjunta en componentes de aquellos ACP de mayor confiabilidad (aunque también aparecen de forma conjunta en componentes de ACP cuyos resultados deben de tomarse con cautela), las parejas de nutrientes P/Ca y Cu/B, parecen presentar un patrón de comportamiento asociativo en las diferentes zonas en que dividimos los sarmientos. En las matrices de correlaciones correspondientes a las variables “nutrientes sarmientos” (**Anexo VII**), se puede observar como las correlaciones existentes entre los nutrientes minerales P/Ca y Cu/B, son siempre de naturaleza positiva.

Matriz de Componentes Rotada*			
	Componente		
	1	2	3
P B	-,040	**,805**	,171
Ca B	,034	**,726**	-,009
Mg B	**,714**	,163	,004
K B	,158	-,126	**,906**
Fe B	**,926**	,113	-,064
Mn B	-,017	,201	**,841**
Zn B	**,705**	-,140	,372
Cu B	**,877**	,081	,079
Lg_{10}B B	**,415**	**,737**	-,149

Matriz de Componentes Rotada*				
	Componente			
	1	2	3	4
P M	,111	**,834**	-,277	-,030
Ca M	-,177	**,495**	,256	-,338
Mg M	**-,436**	-,056	**,765**	,074
K M	**,804**	-,195	-,005	,129
Fe M	-,013	,097	,029	**,940**
Mn M	**,933**	,128	-,037	-,047
Zn M	**,426**	-,308	-,218	**,460**
Cu M	,189	,105	**,806**	-,127
B M	-,147	**,742**	,377	,238

Matriz de Componentes Rotada*			
	Componente		
	1	2	3
P D	**,597**	,334	,299
Ca D	,179	**,893**	,052
Mg D	-,290	**,797**	,055
K D	**,831**	,270	-,279
Fe D	**,657**	-,215	,047
Mn D	**,816**	-,145	,131
Zn D	,397	,322	**-,664**
Cu D	,120	,017	**,658**
B D	,126	,306	**,759**

Matriz de Componentes Rotada*				
	Componente			
	1	2	3	4
P S	-,002	,109	,061	**,811**
Ca S	-,013	-,148	**,742**	**,537**
Mg S	,127	,248	**,814**	-,147
K S	**,835**	-,082	-,066	,336
Mn S	**,498**	,168	**-,431**	**,569**
Zn S	**,775**	-,069	,100	-,136
B S	-,186	**,714**	,281	,237
Lg_{10} Fe S	**,573**	**,504**	,125	-,062
Lg_{10} Cu S	,050	**,821**	-,086	,007

Cuadro nº 7 : Matrices de componentes rotados ACP “nutrientes sarmientos”

De forma análoga se podría realizar la anterior aseveración para la pareja de nutrientes K/Mn, si no fuera porque las bases para realizar la misma no son tan sólidas como en los casos anteriores, pues su presencia conjunta no se mantiene en los ACP cuya fiabilidad no es puesta en duda por los estadísticos de contraste reseñados en párrafos anteriores. Únicamente, y habiendo tenido en cuenta las recomendaciones aportadas por Tabachnick y Fidell (2007), puede interpretarse que K y Mn muestran una naturaleza asociativa en la zona basal de los sarmientos, de tal forma que pudiera esto manifestar una posible influencia de la posición del sarmiento, sobre la presencia y el comportamiento de ambos nutrientes minerales en los sarmientos de vid.

La existencia de un posible patrón de comportamiento asociativo para K/Mn/Zn en los sarmientos, parece intuirse en la estructura de los diferentes ACP, pero la existencia de demasiados motivos en su contra (ausencia de fiabilidad en el ACP, variables con puntuaciones moderadas y presencia simultánea en diversos componentes dentro de un ACP, ...), no permiten nada más que eso, realizar una sutil sugerencia.

4.7 PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE

4.7.1 Exposición de los diversos modelos de regresión objeto de estudio

En el Análisis de Componentes Principales, se ha procedido a obtener las puntuaciones factoriales para cada caso, empleando para este fin el método de regresión, con la rotación de componentes que para cada caso se ha considerado como apropiada (ortogonal u oblicua). Lo señalado, presenta una importancia vital, pues las puntuaciones factoriales para cada caso, son dependientes del método de extracción utilizado y del método de rotación seleccionado.

Estas puntuaciones factoriales, han sido posteriormente empleadas en la realización de un análisis de correlación entre las puntuaciones factoriales para cada uno de los componentes extraídos en el Análisis de Componentes Principales de las variables de suelo, limbo y peciolo. A través de la matriz de correlaciones creada a partir de las puntuaciones factoriales, se seleccionan las variables “nutrientes peciolo” sobre la cuales se va a realizar una serie de análisis de regresión múltiple, de tal forma que se posicionarán como variables dependientes las variables nutrientes, correspondientes a los peciolos de vid, seleccionadas como más idóneas, obteniéndose una serie de modelos matemáticos lineales (**Tabla nº 13**).

MODELOS OBJETO DE ESTUDIO	
VARIABLE DEPENDIENTE	**EXPRESIÓN LINEAL DEL MODELO**
V.D. (Ca P)	$\mathrm{Ca\ P} = 0{,}589 + 0{,}639\ \mathrm{Ca\ L} - 0{,}02\ \mathrm{Fe\ L}$
V.D. (Mg P)	$\mathrm{Mg\ P} = 0{,}14 + 1{,}86\ \mathrm{Mg\ L} - 0{,}02\ \mathrm{Cu\ L}$
V.D. (Zn P)	$\mathrm{Zn\ P} = 11{,}66 + 101{,}18\ \mathrm{Mg\ L} - 1{,}28\ \mathrm{Cu\ L}$
V.D. (Cu P)	$\mathrm{Cu\ P} = 4{,}53 + 0{,}48\ \mathrm{Cu\ L} - 13{,}26\ \mathrm{Mg\ L}$
V.D. (K P)	$\mathrm{K\ P} = 3{,}63 + 1{,}12\ \mathrm{K\ L} - 2{,}06\ \mathrm{Lg10Arcilla} + 0{,}58\ \mathrm{Lg10Mg}$
V.D. (Mn P)	$\mathrm{Mn\ P} = 2{,}00 + 1{,}52\ \mathrm{Mn\ L}$
V.D. (B P)	$\mathrm{B\ P} = 14{,}47 + 0{,}53\ \mathrm{B\ L} - 75{,}03\ \mathrm{P\ L}$
V.D. (P P)	$\mathrm{P\ P} = 0{,}08 + 0{,}12\ \mathrm{Lg10Ca}$
V.D. (Mn P)	$\mathrm{Mn\ P} = 281{,}22 + 1{,}38\ \mathrm{Mn\ L} - 165{,}57\ \mathrm{Lg10Ca} + 116{,}40\ \mathrm{Lg10C.\ E.}$

Tabla nº 13: Estructura de los modelos objeto de estudio

El hecho de haber tomado la decisión de que las variables dependientes sean las concentraciones de nutrientes en los peciolos de vid, tiene su fundamento en lo siguiente: la disponibilidad de nutrientes en la vid, suele ser contrastada a través del análisis de tejidos vegetales. Cook, citado por Jackson (2008), observó como los peciolos de la vid, constituían un excelente tejido con fines de asesoramiento nutricional, pues a su naturaleza acumuladora de nutrientes, hay que añadir la facilidad con la que se pueden obtener una gran cantidad de muestras, de tal forma que la validez estadística del muestreo, se alcanza con mayor facilidad.

4.7.2 Visión global de los modelos de regresión objeto de estudio

En esta sección de la interpretación del procedimiento de regresión múltiple, se ofrece una visión global de los modelos obtenidos (Sinopsis y ANOVAs de los diversos modelos). El procedimiento que hemos empleado para la introducción de variables independientes en el modelo, presenta un criterio puramente matemático, recibiendo la denominación de "regresión paso a paso". Este algoritmo funciona de la siguiente forma: parte del modelo sin ninguna variable independiente y en cada etapa, se introduce la variable independiente más significativa, de tal forma que en cada etapa se replantea si todas las variables introducidas deben de permanecer. El algoritmo finaliza cuando ninguna variable independiente entra o sale del modelo. Este algoritmo, al no mantener fijas en el modelo las variables independientes que ya entraron en una etapa, limita los posibles problemas de multicolinealidad, siendo un algoritmo que en la práctica ofrece resultados bastante razonables cuando se tiene un número grande de variables independientes.

En todos los modelos de regresión objeto de estudio, $\text{Sig.}(F) < 0{,}05$ (**Tabla nº 14**), de tal forma que se puede concluir que, las concentraciones de las variables dependientes en peciolo obtenidas a partir de los modelos de regresión, son sensiblemente mejores que si únicamente empleamos la media como valor de referencia (a partir de los valores de la significación del estadístico de contraste F, se concluye que hay relación lineal significativa entre las variables dependientes e independientes de los diversos modelos de regresión planteados).

RESUMEN DE LOS ANOVAs DE LOS MODELOS OBJETO DE ESTUDIO

VARIABLE DEPENDIENTE	Estadístico F	Sig. (F)
V.D. (Ca P)	19,745	+++
V.D. (Mg P)	35,269	+++
V.D. (Zn P)	15,261	+++
V.D. (Cu P)	16,965	+++
V.D. (K P)	13,918	+++
V.D. (Mn P)	166,712	+++
V.D. (B P)	16,833	+++
V.D. (P P)	9,778	++
V.D. (Mn P)	69,288	+++

*-, Nivel de significación superior al 5 %; +, Nivel de significación del 5 % (p<0,05); ++, Nivel de significación del 1 % (p<0,01); +++, Nivel de significación del 1 ‰ (p<0,001)

Tabla nº 14: ANOVAs de los modelos objeto de estudio

La valoración de nuestros modelo de regresión en base a la observación de la

sinopsis de los mismos definida en la **Tabla nº 15** , es la siguiente: la asociación entre las variables independientes y la variable dependiente, se puede considerar de perfil débil (<40% de variabilidad explicada por las variables independientes) en el modelo **P P**, de perfil medio (40-60% de la variabilidad explicada por las variables independientes) en los modelos **Ca P, Mg P, Zn P, Cu P, K P** y **B P**, y de perfil fuerte (>75% de variabilidad explicada por las variables independientes) en las dos modelizaciones efectuadas en **Mn P** como variable dependiente. Aunque en la columna correspondiente a $R^2_{adj.}$, se incluye únicamente el valor correspondiente al último paso de la regresión de tipo "paso a paso" efectuada, en todos los casos la inclusión de nuevas variables independientes en los pasos sucesivos de este tipo de regresión, redujo el cuadrado de los errores medios, de tal forma que se redujo la variación residual que no puede ser explicada por las variables independientes. A partir de los valores del error estándar para cada uno de los modelos de regresión llevados a cabo, se podrá obtener el valor que el modelo nos propondrá como límite para el 95% de los errores en la predicción. Observando los valores que presenta el estadístico de contraste Durbin-Watson, el cual es dependiente del tamaño muestral (n) y el número de variables independientes del análisis de regresión (k), y atendiendo a los valores críticos d_L y d_U consignados para contrastar el citado estadístico D (Sharpe et al., 2010), no se evidencian circunstancias que nos hagan pensar en una autocorrelación, ni de tipo positiva ni de tipo negativa, por lo que se puede asumir la independencia de los valores residuales (se cumple entonces, la presunción de valores residuales incorrelados).

SINOPSIS DE LOS MODELOS					
MODELO	**R**	**R^2**	**R^2 Ajustada**	**Error estándar de la estimación**	**Durbin - Watson**
V.D. (Ca P)	,684	0,47	0,44	,21	2,22
V.D. (Mg P)	,781	0,61	0,59	,08	1,95
V.D. (Zn P)	,636	0,40	0,38	7,05	1,65
V.D. (Cu P)	,656	0,43	0,40	1,29	1,87
V.D. (K P)	,698	0,49	0,45	,44	1,76
V.D. (Mn P)	,885	0,78	0,78	76,19	1,75
V.D. (B P)	,654	0,43	0,40	8,87	1,72
V.D. (P P)	,419	0,18	0,16	,07	1,72
V.D. (Mn P)	,908[c]	0,83	0,81	70,02	1,69

Tabla nº 15: Tabla sinóptica de los modelos objeto de estudio

4.7.3 Coeficientes de regresión en los modelos de regresión objeto de estudio

Las valoraciones más importantes que pueden ser resaltadas a partir de los datos de los modelos de regresión definidos en la **tabla nº 16**, "Coeficientes de los modelos", son las siguientes: cuando la naturaleza del nutriente se presenta a ambos lados del modelo lineal (en una gran mayoría de las ocasiones), la relación existente entre las variables dependientes "nutriente en peciolo" y ese mismo nutriente en las variables independientes "nutriente en limbo", es siempre de naturaleza positiva. Observando los intervalos de confianza para todas las variables independientes existentes en los modelos, se confirma la naturaleza de la relación ofrecida por los modelos entre estas variables independientes y las variable dependientes "nutriente en peciolo". Los valores hallados en el test-t para los coeficientes de regresión, nos

indican que en todos los casos, las variables independientes realizan una contribución significativa en el modelo. Observando los coeficientes estandarizados, así como los valores obtenidos en el test-t, se puede concluir que, cuando aparece como variable independiente un nutriente en limbo de la misma naturaleza que el nutriente en peciolo empleado como variable dependiente en el modelo, el primero de ellos es el que presenta un mayor peso como variable de predicción en el modelo frente al resto de variables dependientes de cada modelo. A partir, tanto de los valores individuales de VIF, como de los valores $\overline{VIF}$ presentes en los modelos, se puede concluir que la colinealidad parece no presentarse como un problema para ninguno de los mismos.

4.7.4 Diagnósticos de colinealidad para los modelos de regresión objeto de estudio

A continuación, se presenta la tabla de diagnósticos de colinealidad para los diversos modelos objeto de estudio (**Tabla nº 17**), la cual contiene información adicional sobre los niveles de tolerancia y sus inversos (VIF). En esta sección, aparecen los autovalores, los cuales ofrecen información acerca de cuantas dimensiones subyacen en el conjunto de variables independientes empleadas; los índices de condición, cuyo origen es la raíz cuadrada del cociente entre el autovalor más grande y cada uno del resto de autovalores; y la proporción de varianzas, que recogen la proporción de varianza de cada coeficiente de regresión parcial que está explicado por cada dimensión.

COEFICIENTES DE LOS MODELOS								
MODELO		Coeficientes no estandarizados (B)	Coeficientes estandarizados (β)	t	Sig. (t)*	I. C. (95%) para B	Estadísticos de Colinealidad	
							Tolerancia	VIF
V.D. (Ca P)	Constante	,589		5,976	+++	,390 - ,787		
	Ca L	,639	,696	6,232	+++	,43 – ,85	,950	1,05
	Fe L	-,002	-,243	-2,175	+	-0,004 – (-,0002)	,950	1,05
V.D. (Mg P)	Constante	,14		1,861	+	-,012 - ,293		
	Mg L	1,86	,685	7,246	+++	1,34 – 2,38	,970	1,03
	Cu L	-,02	-,275	-2,915	++	-,04 – (-,007)	,970	1,03
V.D. (Zn P)	Constante	11,66		1,845	+	-1,066 – 24,379		
	Mg L	101,18	,551	4,711	+++	57,92 – 144,44	,970	1,03
	Cu L	-1,28	-,236	-2,019	+	-2,56 – (-0,003)	,970	1,03
V.D. (Cu P)	Constante	4,53		3,898	+++	2,190 – 6,872		
	Cu L	,48	,469	4,104	+++	,24 – ,71	,970	1,03
	Mg L	-13,26	-,383	-3,354	++	-21,22 - -5,30	,970	1,03
V.D. (K P)	Constante	3,63		3,625	+++	1,612 – 5,650		
	K L	1,12	,562	4,991	+++	,67 – 1,57	,920	1,09
	Lg10ARCILLA	-2,06	-,427	-3,241	++	-3,33 – (-, 78)	,672	1,49
	Lg10Mg	,58	,268	2,034	+	,01 – 1,16	,673	1,49
V.D. (Mn P)	Constante	2,00		,081	-	-47,487 – 51,485		
	Mn L	1,52	,885	12,912	+++	1,28 – 1,76	1,000	1,00
V.D. (B P)	Constante	14,47		3,835	+++	6,871 – 22,074		
	B L	,53	,623	5,485	+++	,34 - ,73	,985	1,02
	P L	-75,03	-,290	-2,552	+	-134,24 – (-,15,82)	,985	1,02
V.D. (P P)	Constante	,08		3,268	++	,032 - ,133		
	Lg10Ca	,12	,419	3,127	++	,04 - ,20	1,000	1,00
V.D. (Mn P)	Constante	281,22		2,816	++	79,946 – 482,493		
	Mn L	1,38	,805	11,539	+++	1,14 – 1,63	,815	1,23
	Lg10Ca	-165,57	-,252	-3,170	++	-270,84 – (-60,31)	,627	1,60
	Lg10CE	116,40	,153	2,097	+	4,51 – 228,29	,742	1,35

*-, Nivel de significación superior al 5 %; +, Nivel de significación del 5 % (p<0,05); ++, Nivel de significación del 1 % (p<0,01); +++, Nivel de significación del 1 ‰ (p<0,001)

Tabla nº 16: Coeficientes de regresión de los modelos objeto de estudio

La valoración que podemos realizar sobre nuestros modelos de regresión, tomando como base los datos definidos en la **tabla nº 17** "Diagnósticos de colinealidad", es la siguiente: a través del reparto de las proporciones de varianza sobre los diferentes autovalores, se presume la no existencia de muticolinealidad.

4.7.5 Estadísticos residuales en los modelos de regresión objeto de estudio

A continuación, se presenta la tabla de estadísticos residuales (**Tabla nº 18**), en la cual se nos proporciona información acerca del grado de exactitud de los pronósticos en la variable dependiente, sirviendo de igual modo como ayuda en la detección de posibles casos atípicos.

Para ofrecer un diagnóstico de los valores residuales estandarizados, tomamos como referencia las puntuaciones-z presentes en una distribución normal, de tal forma que establecemos como motivo de seria preocupación acerca del pobre ajuste de nuestro modelo, que mas de un 1% de nuestros casos, presente valores superiores a los valores de las puntuaciones-z que determinan el 99% de la superficie de la distribución normal.

En los modelos que incluyen como variable dependiente **Ca P** y **Mg P**, nuestra preocupación por la bondad de ajuste del modelo, está fundamentada a tenor de los datos observados en los valores residuales estandarizados para cada uno de los casos.

DIAGNÓSTICOS DE COLINEALIDAD DE LOS MODELOS

MODELO	Dimension	Proporciones de Varianza			
		Constante	V.D. 1	V. D. 2	V. D. 3
V.D. (Ca P)	1	,01	,02	,01	-
	2	,07	,95	,16	-
	3	,92	,03	,82	-
V.D. (Mg P)	1	,00	,00	,01	-
	2	,01	,19	,66	-
	3	,99	,81	,33	-
V.D. (Zn P)	1	,00	,00	,01	-
	2	,01	,19	,66	-
	3	,99	,81	,33	-
V.D. (Cu P)	1	,00	,01	,00	-
	2	,01	,66	,19	-
	3	,99	,33	,81	-
V.D. (K P)	1	,00	,01	,00	,00
	2	,00	,00	,00	,66
	3	,01	,91	,02	,09
	4	,99	,08	,98	,24
V.D. (Mn P)	-	-	-	-	-
V.D. (B P)	1	,02	,04	,02	-
	2	,05	,94	,09	-
	3	,94	,02	,90	-
V.D. (P P)	-	-	-	-	-
V.D. (Mn P)	1	,00	,01	,01	,00
	2	,00	,34	,18	,00
	3	,01	,57	,32	,10
	4	,99	,08	,50	,90

Tabla nº 17: Diagnósticos de colinealidad de los modelos objeto de estudio

El diagnóstico que nos ofrecen los valores residuales estandarizados para el caso de los modelos que sitúan como variable dependiente **Zn P**, **K P, P P** y en el caso **Mn P** por partida doble, es el de una bondad de ajuste del modelo adecuada, a tenor de los datos que observamos en los valores residuales estandarizados para cada uno de los casos; esta confianza en el modelo, se mantiene revisando los valores residuales estandarizados y sometiéndolos a la restricción de no aceptación de un 5% de valores superiores a las puntuaciones-z que determinan el 95% de la superficie de la distribución normal.

ESTADÍSTICOS RESIDUALES DE LOS MODELOS

MODELO	Residuales Estandarizados		Distancia de Mahalanobis		Distancia de Cook		Valor de Influencia Centrado		N
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
V.D. (Ca P)	-2,723	1,857	,111	12,171	,000	,347	,002	,259	48
V.D. (Mg P)	-2,959	2,752	,128	12,704	,000	0,268	,003	,270	48
V.D. (Zn P)	-1,977	2,562	,128	12,704	,000	,229	,003	,270	48
V.D. (Cu P)	-1,365	3,315	,128	12,704	,000	,188	,003	,270	48
V.D. (K P)	-2,023	1,780	,143	17,239	,000	,341	,003	,367	48
V.D. (Mn P)	-2,103	1,864	,000	5,277	,000	,137	,000	,112	48
V.D. (B P)	-1,637	3,659	,031	19,133	,000	1,169	,001	,407	48
V.D. (P P)	-1,949	1,920	,000	3,886	,000	,102	,000	,083	48
V.D. (Mn P)	-1,754	2,045	,236	6,996	,000	,111	,005	,149	48

Tabla nº 18: Estadísticos residuales de los modelos objeto de estudio

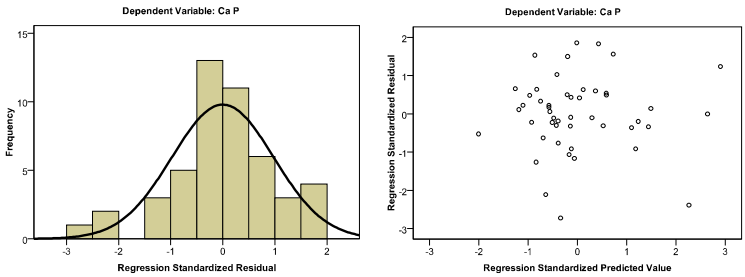
El diagnóstico que nos ofrecen los valores residuales estandarizados para el caso de los modelos que sitúan a **Cu P** y **B P** como variable dependiente, es el de una seria preocupación por la bondad de ajuste del modelo, la cual está fundamentada, a tenor de los datos que observamos en los valores residuales estandarizados.

Observando los valores de la distancia de Mahalanobis para el modelo **Ca P, Mg P, Zn P, Cu P, K P** y siguiendo las recomendaciones ofrecidas por Barnett y Lewis (1978), se delata la existencia de algún caso en nuestros datos, que ejerce una influencia indebida sobre los parámetros del modelo. Sin embargo, observando los valores de la distancia de Cook para este mismo modelo, y siguiendo las recomendaciones ofrecidas por Cook y Weisberg (1982), no se delata la existencia de algún caso en nuestros datos, que ejerza una gran influencia sobre el modelo.

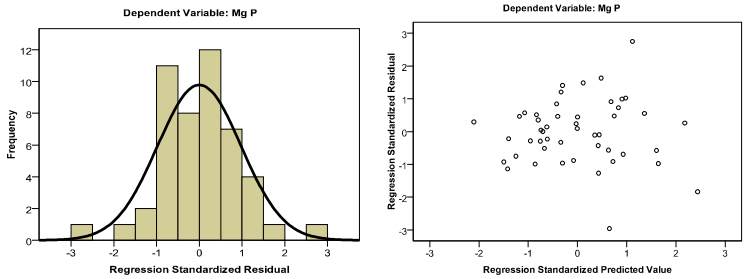
Observando los valores de la distancia de Mahalanobis para ambos modelos **Mn P**, así como para el modelo **P P**, y siguiendo las recomendaciones ofrecidas por Barnett y Lewis (1978), no se delata la existencia de algún caso en nuestros datos, que pueda ejercer una influencia indebida sobre los parámetros del modelo. De igual forma, observando los valores de la distancia de Cook para este mismo modelo, y siguiendo las recomendaciones ofrecidas por Cook y Weisberg (1982), no se delata la existencia de algún caso en nuestros datos, que ejerza una gran influencia sobre el modelo.

Observando los valores de la distancia de Mahalanobis para el modelo **B P**, y siguiendo las recomendaciones ofrecidas por Barnett y Lewis (1978), se delata la existencia de algún caso en nuestros datos, que ejerce una influencia indebida sobre los parámetros del modelo. De igual forma, observando los valores de la distancia de

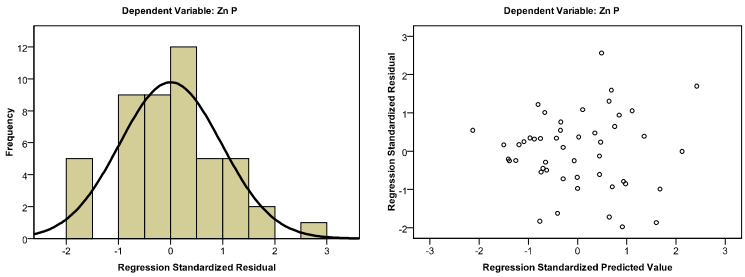
Cook, y siguiendo las recomendaciones ofrecidas por Cook y Weisberg (1982), se delata la existencia de algún caso en nuestros datos, que ejerza una gran influencia sobre el modelo.



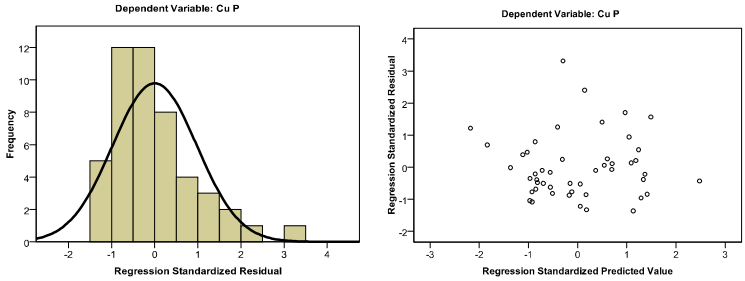
Histogramas de residuos y Gráfico de dispersión del modelo **Ca P**



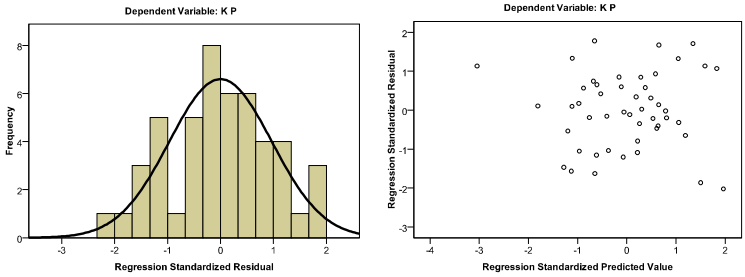
Histogramas de residuos y Gráfico de dispersión del modelo **Mg P**



Histogramas de residuos y Gráfico de dispersión del modelo **Zn P**

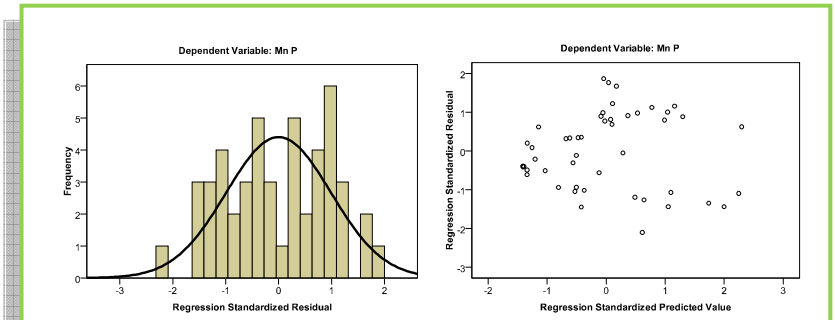


Histogramas de residuos y Gráfico de dispersión del modelo **Cu P**

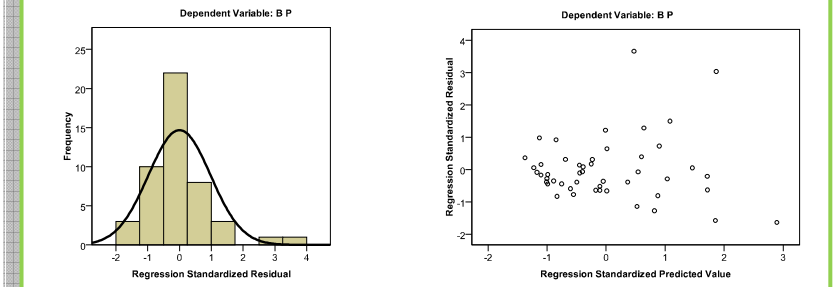


Histogramas de residuos y Gráfico de dispersión del modelo **K P**

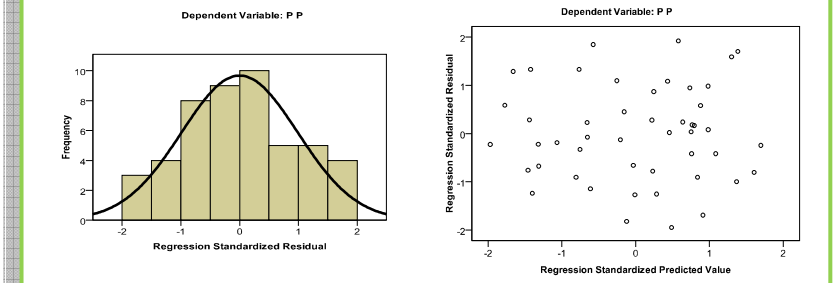
Figura nº 27: Histogramas de residuos y Gráficos de dispersión de los modelos objeto de estudio



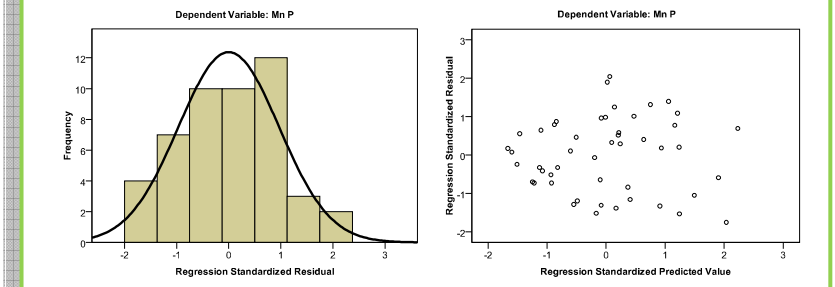
Histogramas de residuos y Gráfico de dispersión del modelo **Mn P**



Histogramas de residuos y Gráfico de dispersión del modelo **B P**



Histogramas de residuos y Gráfico de dispersión del modelo **P P**



Histogramas de residuos y Gráfico de dispersión del modelo **Mn P**

Figura nº 28: Histogramas de residuos y Gráficos de dispersión de los modelos objeto de estudio (Cont.)

4.7.6 Histogramas de residuos y gráficos de dispersión en los modelos de regresión objeto de estudio

En las **figuras nº 27 y nº 28,** se muestran los gráficos correspondientes al histograma de los residuos tipificados y al diagrama de dispersión de pronósticos tipificados por residuos tipificados. A partir del diagrama de dispersión de pronósticos tipificados por residuos tipificados, se valida el supuesto de homocedasticidad o igualdad de varianzas, que implica que la variación de los residuos debe ser uniforme en todo el rango de valores pronosticados (es decir, el tamaño de los residuos es independiente del tamaño de los pronósticos); este diagrama de dispersión también

presenta la utilidad adicional de permitir detectar relaciones de tipo no lineal entre las variables.

Observando los histogramas de residuos tipificados, podemos concluir la existencia en los mismos de una distribución aproximadamente normal para todos los modelos de regresión objeto de estudio, de tal forma que consideramos satisfecha la presunción de distribución normal de los valores residuales.

Por su parte, en los gráficos de dispersión de Pronósticos tipificados vs. Residuos tipificados, se muestran distribuciones de puntos característica de mediciones de homocedasticidad en todos los modelos lineales planteados. Así mismo, a través de estos gráficos, no se observan condiciones que nos hagan presumir ausencia de linealidad.

4.8 VALORACIÓN AGRONÓMICA DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN

4.8.1 Variable Dependiente: Ca Peciolo; Variables Independientes: Ca Limbo y Fe Limbo

Una elevada proporción del Ca^{2+} presente en *Vitis vinífera* L. se encuentra localizada en las paredes celulares. De hecho, las paredes celulares probablemente deben su rigidez a las interrelaciones de las pectinas por medio del Ca^{2+} (Ferguson, 1984; Jarvis, 1984). Otra zona importante de acumulación de Ca^{2+}, en la forma de oxalato, es la vacuola celular. Los cristales de oxalato de Ca, pueden presentar un papel defensivo disuadiendo el apetito de los herbívoros. Como consecuencia de su aptitud para conectar lípidos y proteínas en las superficies de membrana, el Ca^{2+} es importante en el mantenimiento de la integridad de las membranas, previniendo daños a la membrana y la pérdida de solutos (Clarkson y Hanson, 1980; Hirschi, 2004). Los iones de Ca^{2+} pueden alterar la permeabilidad hídrica de las membranas a través de la modulación de la actividad de las acuaporinas (Johansson et al., 2000). Como añadidura a lo anterior, el Ca se encuentra involucrado en los procesos de señalización intracelular de respuesta frente al estrés osmótico originado frente a factores medioambientales (Plieth, 2005; Zhu, 2002). El Ca sirve también como segundo mensajero, por lo cual un estímulo externo conduce a un incremento de las especies reactivas de oxígeno, lo cual resulta en oscilaciones temporales en las concentraciones de Ca^{2+} en el citosol (Hetherington y Brownlee, 2004; McAinsh y Pittman, 2009).

A elevadas concentraciones, el Ca^{2+} puede desestabilizar el metabolismo mediante la precipitación del P como $CaHPO_4$ (Plieth, 2005); de esta forma, elevadas concentraciones de Ca son extremadamente tóxicas para las células vegetales. Las plantas emplean bombas accionadas por ATP para conservar la concentración de Ca en una magnitud del orden tres o cuatro veces inferior a la existente en el apoplasto y en la vacuola (Hetherington y Brownlee, 2004; Hirschi, 2004; McAinsh y Pittman, 2009). A consecuencia del escaso control de las plantas sobre la absorción de Ca^{2+}, la cual tiene lugar a través de canales de cationes no selectivos, realizan un secuestro del mismo como cristales de oxalato de Ca dentro de células especializadas denominadas idioblastos con el objeto de prevenir fenómenos de toxicidad (Franceschi y Nakata, 2005). Los idioblastos están localizados en las raíces, limbos foliares (especialmente a lo largo de las nerviaciones), peciolos y bayas. Esta

biomineralización, sitúa el Ca soluble fuera de circulación, y los cristales pueden servir como formas de acumulación que pueden ser rápidamente movilizadas durante etapas de escasa absorción de Ca y durante las primeras etapas del desarrollo primaveral.

A consecuencia de la virtual inmovilidad del Ca en el floema, es suministrado de forma preferencial a los órganos que ejercen el proceso de la transpiración, como son las hojas adultas, comenzando a ser inmóvil una vez que se ha depositado en un órgano concreto; además de las hojas, la corteza parece ser el mayor sumidero de Ca en las vides (Conradie, 1981b). De esta forma, los síntomas de deficiencia de Ca, aparecen principalmente en las hojas jóvenes. Debido a su importancia para el desarrollo del tubo polínico, la deficiencia de Ca es perjudicial en el proceso de fertilización y cuajado de la baya. Aunque el Ca suministrado a través del xilema tiende a acumularse en las regiones estomáticas de las bayas de la vid (Blanke et al., 1999), la deficiencia localizada en las bayas puede ser promovida por una transpiración excesiva del follaje o por un rápido desarrollo de los pámpanos, desviando el flujo del xilema, y por lo tanto el suministro de Ca, lejos de las bayas. Esto puede ser especialmente pronunciado durante períodos de rápida expansión celular de las bayas, que requieren Ca^{2+} para incorporarlo a las nuevas membranas y paredes celulares. De forma opuesta, un suministro excesivo de Ca, puede retardar la velocidad de maduración de las bayas (Ferguson, 1984). No obstante, un suministro abundante de Ca en la planta puede incrementar la supervivencia de la planta después de atravesar períodos gélidos.

Una insuficiencia en el suministro de Ca a la vid, puede conllevar que la planta se muestre más susceptible a los daños causados por la salinidad y la existencia de condiciones edáficas ácidas (Hirschi, 2004; Plieth, 2005). Las deficiencias de Ca en condiciones naturales, se presentan principalmente en suelos con pH muy bajo, ya que la especie iónica de aluminio (Al^{3+}), comienza a ser soluble cuando el pH es inferior a 5,0 provocando en estas situaciones un bloqueo en la absorción del Ca^{2+}. Por otra parte, un contenido excesivo de K^{+} (Delas y Pouguet, 1984) y/o Mg^{2+} así como la salinidad, pueden inducir la aparición de deficiencias de Ca. Las vides que se desarrollan en suelos calcáreos, generalmente presentan un mayor contenido de Ca en los tejidos (y a menudo, también mayor concentración de Mg y menor de K) que las vides que se desarrollan en cualquier otro tipo de suelos.

En nuestro modelo de regresión “paso a paso” efectuado sobre la variable dependiente Ca P, se han obtenido como variables independientes significativas, las variables Ca L y Fe L, la primera de ellas con signo positivo y la segunda con signo negativo. El hecho de encontrar el mismo signo entre las variables Ca P y Ca L en el modelo de regresión, induce a interpretar la existencia de una interacción sinérgica en cuanto a la concentración del nutriente Ca en ambos tejidos foliares, de tal forma que el incremento de la concentración del nutriente Ca en uno de los tejidos foliares, conllevará un consecuente incremento de la concentración en el otro. En este mismo sentido, se han manifestado García et al. (1999) en sus experiencias en vid sobre la variedad Négrette clon 456/101.14 M. G. clon 3.

Por otra parte, el signo opuesto manifestado entre los nutrientes Ca y Fe, parece manifestar un comportamiento antagónico entre ambos nutrientes en los tejidos foliares de vid, de tal forma que el incremento en la concentración de uno de

estos nutrientes, conllevará una disminución en la concentración del otro. Lo anterior presenta una gran importancia, pues el hierro, se puede aseverar que es el microelemento más abundante en las vides (Gärtel, 1993). El hierro, se muestra extremadamente insoluble en entornos ricos en oxígeno, entre los cuales se incluyen muchos de los suelos dedicados a la viticultura (Schmidt, 2003). A consecuencia de su aptitud para acontecer en dos formas iónicas diferentes $(Fe^{2+} y\, Fe^{3+})$, es un importante cofactor de proteínas que se encuentran involucradas en la transferencia de electrones (como por ejemplo la ferredoxina) y de diversas enzimas catalizadoras reacciones redox (reducción/oxidación) (Clarkson y Hanson, 1980; Curie y Briat, 2003; Curie et al., 2009). Se encuentra involucrado en la síntesis de clorofila (aunque la molécula de clorofila no contiene Fe), en la fotosíntesis, en los procesos respiratorios, en la síntesis y degradación de lípidos y hormonas, en la síntesis y reparación del ADN y, vía activación enzimática, en la asimilación de C, N Y S, así como en la detoxificación de especies reactivas oxigenadas. Además de en hojas, el Fe se encuentra con relativa abundancia en las semillas y en los granos de polen, pudiendo ser necesario para la producción de los granos de polen (Curie et al., 2009).

En las capas superiores del medio edáfico (en presencia de oxígeno), el hierro, generalmente, se encuentra en la forma oxidada Fe^{3+} (ión férrico), aunque la forma reducida (Fe^{2+}) constituye el catión soluble, siendo la forma requerida por las plantas. No obstante, la forma férrica constituye complejos solubles (quelatos) con diversas moléculas orgánicas e inorgánicas, incluyendo ácidos húmicos y fúlvicos, taninos y fosfatos. De la misma forma que el resto de plantas que se engloban bajo el término de “especies con estrategia I” (Briat y Lobréaux, 1997), las especies del género *Vitis* absorben moléculas de Fe en forma de quelatos- Fe^{3+}, y a través de la enzima Fe-quelato reductasa (FCR) es reducido a Fe^{2+} en las membranas plasmáticas del sistema radicular (Bavaresco et al., 1991; Schmidt, 2003; Varanini y Maggioni, 1982). Los iones Fe^{2+} son movidos hacia las hojas vía xilemática principalmente como complejos citrato- Fe^{3+} inactivos metabólicamente (Curie y Briat, 2003). Una vez que se encuentra en las hojas, se produce una activación hacia la forma Fe^{2+} a través de la enzima FCR, antes de que pueda ser transportado hacia el mesófilo de las hojas. La proteína FCR es sensible a las variaciones de pH, declinando la actividad enzimática a medida que el pH del apoplasto se ve incrementado (Nikolic et al., 2000). Dentro de las células, el Fe que no es utilizado, sufre de nuevo un proceso de quelación por medio de un aminoácido denominado nicotianamina, que aparentemente, sirve para mantener el Fe en forma soluble y asegurar así su correcta distribución entre los diversos orgánulos celulares y en el floema (Curie y Briat, 2003; Curie et al., 2009; Schmidt, 2003).

Aunque la forma Fe^{3+} puede ser almacenada en una proteína denominada ferritina, aproximadamente el 80% del Fe en la hoja está localizado en el cloroplasto formando parte de la maquinaria fotosintética. Por lo tanto, la deficiencia de Fe genera problemas en el proceso fotosintético, reduciéndose la producción de azúcares con destino a los órganos sumideros de la vid (Bertamini y Nedunchezhian, 2005).

Los síntomas de deficiencia incluyen clorosis foliar, la cual comienza en los márgenes de las hojas jóvenes y avanza hacia las zonas internervales, seguida de una necrosis marginal y, finalmente, acontece la abscisión. Se impide el crecimiento de los brotes laterales, mostrando a menudo coloraciones rosáceas en sus internudos, y en ellos se disponen hojas pequeñas y cloróticas (Curie y Briat, 2003).

Ante condiciones de deficiencia severa, los zarcillos y las inflorescencias también muestran síntomas de clorosis, siendo el cuajado pobre (Gärtel, 1993), probablemente a causa del requerimiento del Fe para el desarrollo del polen.

La manifestación de que ambos nutrientes presenten un patrón de comportamiento opuesto en cuanto a su presencia en los tejidos foliares, pudiera hallar respuesta en las condiciones de pH del suelo. A este respecto se ha manifestado Marschner (1995), indicando como la absorción de cationes Ca^{2+} por parte de las plantas, se ve ralentizada en suelos cuyo pH manifieste condiciones de acidez del suelo, mientras que la dinámica de absorción de este catión es la opuesta a medida que el pH del suelo se ve incrementado. Este mismo autor, indica que la dinámica de absorción por parte de la planta del metal Fe ante la naturaleza de la reacción del suelo, es la opuesta a la manifestada para el Ca. El incremento de la absorción de Fe por parte de *Vitis vinífera* L. como respuesta a condiciones de acidificación del medio, también ha sido puesto de manifiesto por Brancadoro et al. (1995), Jiménez et al. (2007) y Mengel y Malissiovas (1982). Barber (1995), se manifiesta en la misma línea de los resultados mostrados en esta tesis, de tal forma que afirma que la existencia de elevadas concentraciones de Ca^{2+} inhibe la absorción de Fe por parte de la planta.

La toxicidad por Fe es muy rara en condiciones naturales, ciñéndose de forma principal a las condiciones de suelos ácidos (Kochian et al., 2004). Sin embargo, el desarrollo de condiciones cloróticas en hojas como consecuencia de la deficiencia de Fe, se desarrolla con relativa frecuencia en las vides que se desarrollan en condiciones de suelos calcáreos, los cuales son prevalentes, por ejemplo, en la Ribera del Duero en España, o en las regiones de Burdeos y Champagne en Francia.

En las hojas que manifiestan clorosis por deficiencia de Fe, se presenta la siguiente paradoja: la concentración total de Fe en las mismas, es a menudo similar o incluso mayor que la que se presenta en las hojas verdes sanas, lo cual en parte se debe a que las hojas cloróticas son habitualmente más pequeñas (Sattelmacher, 2001). No obstante, el contenido de Fe en la hoja no se encuentra íntimamente ligado al contenido de Fe fisiológicamente activo. Como añadidura a lo anterior, es reseñable indicar que las plantas con deficiencia en Fe, presentan tendencia a acumular Zn, Mn, Co y Cd (Curie y Briat, 2003).

4.8.2 Variable Dependiente: Mg Peciolo; Variables Independientes: Mg Limbo y Cu Limbo

Aunque el Mg^{2+} es un componente estructural de la clorofila, menos del 20% del contenido total de Mg de la vid se encuentra formando parte de la clorofila. Como catión divalente que es, el Mg^{2+} es un importante cofactor requerido para activar diversas enzimas y proteínas de transporte (Cakmak y Kirkby, 2008; Clarkson y Hanson, 1980). El patrón de absorción de Mg^{2+} por parte de las raíces de la vid, se muestra muy similar al del K^{+} (Conradie, 1981b).

La deficiencia de Mg se manifiesta de forma muy común en las vides que se desarrollan en suelos arenosos y muy ácidos (pH<4,5), donde las elevadas concentraciones de aluminio (Al^{3+}), amonio (NH_4^+) e hidrogeniones (H_3O^+), tienden a inhibir la absorción de Mg (Gärtel, 1993). No obstante, una elevada disponibilidad de

Ca^{2+} y/o K^{+} puede también reprimir la absorción de Mg [las vides injertadas sobre patrón americano, pueden ser más propensas que las cultivadas sobre pie franco, a sufrir interferencias en la absorción de Mg^{2+} ante elevadas disponibilidades de K^{+} en el medio (Mullins et al., 1992)], e inducir una deficiencia de este último, a consecuencia de la competición que se produce entre los anteriores cationes para su absorción radicular (Delas y Pouget, 1984); lo mismo se puede afirmar para el caso del Na^{+} en los suelos salinos (Shaul, 2002). Ya que el Mg presenta más movilidad en el floema que el Ca, los síntomas de deficiencia de Mg se muestran con mayor premura en forma de decoloración clorótica en áreas internerviales de hojas adultas. No obstante, aún antes de que los síntomas se manifiesten, el efecto inhibidor que la insuficiencia nutricional de Mg provoca sobre la capacidad de carga del floema, conlleva a una acumulación de sacarosa y almidón en las hojas, mientras que la exportación desde las mismas de sacarosa y aminoácidos disminuye (Cakmak y Kirkby, 2008; Cakmak et al., 1994; Hermans et al., 2006). El vínculo existente entre los niveles de Mg y la capacidad exportadora de sacarosa de las hojas, puede constituir la esencia de la correlación negativa observada entre el contenido de Mg en el peciolo y el contenido de azúcar en la baya (van Leeuwen et al., 2004). El incremento de azúcar en las hojas, a su vez, conduce a un mecanismo de inhibición fotosintética retroalimentada lo cual resulta en una degradación de clorofila, probablemente para mitigar el exceso de absorción de luz que conduciría a un estrés oxidativo. De hecho, las plantas deficientes en Mg son extremadamente sensibles a las condiciones lumínicas, siendo los síntomas de deficiencia más aparentes en las hojas expuestas a la luz solar, que aquellas que se encuentran en zonas más sombreadas (Marschner y Cakmak, 1989). El exceso de azúcar es empleado por las hojas para producir antocianos como fotoprotectores en las áreas internerviales de los limbos foliares de las variedades tintas.

Una insuficiente disponibilidad de Mg (en ocasiones, de forma conjunta con niveles de suministro bajos en Ca y elevados en K) han sido implicados también en el desarrollo de un desorden fisiológico originalmente denominado bunch stem necrosis (necrosis del raquis) que puede desarrollarse durante el período de maduración (Cocucci et al., 1988; Keller y Koblet, 1995b). El raquis de los racimos de las plantas afectadas desarrolla un color pardo rojizo que deriva hacia lesiones negras. Las lesiones, probablemente reflejan la oxidación de componentes fenólicos y rápidamente se extienden hacia dentro, a lo largo y/o alrededor del raquis, y en el proceso puede circundar el floema, que interrumpe de forma efectiva el transporte de asimilados a las bayas. El raquis eventualmente se deseca, y en casos severos la porción distal de los racimos afectados puede sufrir el fenómeno de abscisión. Los racimos se muestran más sensibles a esta afección de forma anterior y durante el estado fenológico de floración, recibiendo durante este período esta afección la denominación de necrosis de la inflorescencia, y después del inicio de acumulación de azúcar en el envero (Jackson y Coombe, 1988; Keller et al., 2001a).

En nuestro modelo de regresión “paso a paso” efectuado sobre la variable dependiente Mg P, se han obtenido como variables independientes significativas, las variables Mg L y Cu L, la primera de ellas con signo positivo y la segunda con signo negativo. El hecho de encontrar el mismo signo entre las variables Mg P y Mg L en el modelo de regresión, sugiere la existencia de una interacción sinérgica en cuanto a la concentración del nutriente Mg en ambos tejidos foliares.

Por otra parte, el signo opuesto manifestado entre los nutrientes Mg y Cu, parece manifestar un comportamiento antagónico entre ambos nutrientes en cuanto a las concentraciones de los mismos en los tejidos foliares de vid. La explicación de este fenómeno podría asociarse a la misma que se expresó para la interacción Ca/Fe del modelo anterior, la cual se basaba en la respuesta de la absorción de la planta para ambos nutrientes frente a la naturaleza de la reacción del suelo (Marschner, 1995).

Toselli et al. (2008), en sus experiencias llevadas a cabo sobre *Vitis vinífera* L. var. Sangiovese, observaron una interacción negativa entre los nutrientes Cu y Mg, de tal forma que el incremento del primero en medio de cultivo arenoso, provocaba una disminución de la concentración del segundo en los tejidos foliares (en medio arcilloso, este fenómeno descrito anteriormente, no tenía lugar).

4.8.3 Variable Dependiente: Zn Peciolo; Variables Independientes: Mg Limbo y Cu Limbo

Gran parte del Zn que se encuentra en las plantas, está asociado a proteínas (Broadley et al., 2007). La mayoría de este Zn vinculado a las proteínas, está involucrado en la regulación de la transcripción genética. El zinc y el cobre, constituyen parte integral de la enzima antioxidante superóxido dismutasa (SOD), la cual es una enzima metaloproteinasa que “neutraliza” y se combina con radicales libres de oxígeno (superóxidos) que aparecen como un tóxicos en el metabolismo celular, de tal forma que puede proteger a los tejidos vegetales frente a especies reactivas de oxígeno que conducen a un estrés oxidativo, el cual acontece en diversas formas de estreses medioambientales (Apel y Hirt, 2004).

La deficiencia de Zn resulta en una disminución de la producción de proteínas y almidón, una acumulación de azúcar en las hojas, un acortamiento de los entrenudos, malformaciones de las hojas (asimétricas con un gran seno peciolar y con márgenes dentados puntiagudos) que desarrolla un patrón clorótico a modo de mosaico entre los nervios; los nervios pueden comenzar a mostrar tonos claros con bordes verdes (Gärtel, 1993). Una intensidad luminosa elevada, parece ser que acelera el desarrollo de los síntomas de deficiencia (Marschner y Cakmak, 1989), quizás como resultado del estrés oxidativo. Una deficiencia más severa, retrasa el agostamiento de los sarmientos (formación del peridermo) promoviendo el desarrollo de brotes laterales, mientras que las áreas internervales de las hojas comienzan a tomar tonos castaño-rojizo o bronce, y, posteriormente, necrótica, presentándose un enrollamiento de los limbos foliares (Broadley et al., 2007). En añadidura a lo anterior, un suministro insuficiente de Zn puede inhibir la formación de polen y, por lo tanto, la polinización, lo cual conduce a un pobre cuajado, imitando a lo que sucede cuando se presentan deficiencias por B. La deficiencia severa de Zn conduce a un necrosamiento de los ápices radiculares, lo cual constituye un efecto letal. Por otra parte, las toxicidades por Zn, son extremadamente raras (Broadley et al., 2007).

En el modelo de regresión “paso a paso” efectuado sobre la variable dependiente Zn P, se han obtenido como variables independientes significativas, las variables Mg L y Cu L, la primera de ellas con signo positivo y la segunda con signo negativo. El hecho de encontrar el mismo signo entre las variables Zn P y Mg L en el modelo de regresión, sugiere la existencia de una interacción sinérgica en cuanto a las concentraciones de dichos nutrientes en ambos tejidos foliares. Al respecto de esta

interacción positiva entre los nutrientes Zn y Mg, se manifestó en esos mismos términos Fageria (2009) a raíz de sus ensayos sobre cultivo de *Phaseolus vulgaris*, L., de tal forma que observó como la aplicación de Zn sobre el cultivo mejoraba de forma significativa la absorción de Mg.

En cuanto a la interacción antagónica mostrada por el modelo de regresión entre los nutrientes Zn y Cu, Bowen (1969), a partir de sus experiencias sobre caña de azúcar y Kochain (1991), publicaron como el ión Cu^{2+} ejercía un efecto inhibidor sobre la absorción de Zn^{2+}, sugiriendo que este ión Cu^{2+} competía con el Zn^{2+} por los mismos puntos de transporte. De forma similar, Alloway (2004), publicó que elevadas concentraciones de Cu, con respecto a las de Zn, ejercían un efecto inhibidor en la absorción de Zn por parte de las plantas (y viceversa), a causa de un efecto competitivo entre ambos nutrientes por los mismos puntos de absorción en el sistema radicular. Fageria (2009), confirma la existencia de una interacción antagónica Zn/Cu en los tejidos vegetales, la cual tiene lugar a causa de que la nutrición cúprica de los vegetales afecta a la redistribución del Zn en los tejidos vegetales.

La interacción negativa entre Zn y Cu, no ha quedado muy clara para Toselli et al. (2008), quienes a través de sus ensayos sobre *Vitis vinifera* L. var. Sangiovese, observaron como el incremento de la concentración de Cu en el medio de cultivo, presentaba un efecto depresivo sobre la concentración de Zn en el sistema radicular, pero no en los tejidos foliares. No obstante, tanto McBride (2001) y Sheldon y Menzies (2005) en especies herbáceas, como Woolhouse y Walker (1981) en *Vitis* spp., han observado una reducción en el desarrollo del sistema radicular como respuesta a un exceso de Cu en el medio de cultivo, lo cual podría mostrarse como una posible causa de la disminución en la capacidad de absorción de nutrientes por la vid, entre ellos el Zn.

4.8.4 Variable Dependiente: Cu Peciolo; Variables Independientes: Cu Limbo y Mg Limbo

Como constituyente proteico, el cobre $(Cu^{+}\ y\ Cu^{2+})$ participa en la transferencia de electrones tanto en la fotosíntesis como en el proceso respiratorio, en la lignificación, en la percepción del etileno, en el metabolismo de la pared celular y en la protección frente al estrés oxidativo (en concordancia con el Zn) (Burkhead et al., 2009). Su aptitud para alternar entre las formas iónicas $Cu^{+}\ y\ Cu^{2+}$ no solo hace que el Cu sea un cofactor esencial en diversa enzimas oxidadsa que catalizan reacciones redox, sino que contribuye a su toxicidad inherente (Clarkson y Hanson, 1980; Yruela, 2009). Un estado nutritivo nitrogenado elevado, da la apariencia de incrementar la demanda de Cu por parte de la planta (Yruela, 2009). El Cu, móvil en el floema, puede ser movilizado desde las hojas maduras para su redistribución hacia órganos sumideros, ante el caso de necesidades extras de Cu, aunque este proceso parece ser no muy eficiente, ya que las hojas jóvenes sufren un mayor impacto por la deficiencia de Cu que las hojas adultas (Burkhead et al., 2009; Marschner, 1995).

Los síntomas de deficiencia incluyen la inhibición del desarrollo radicular, reducción en el desarrollo de los pámpanos, tonos verde pálidos e incluso aparición de clorosis en hojas (a menudo rizándose el margen de las mismas) y una disminución de la tasa del cuajado a causa de una menor viabilidad del polen y el embrión

(Marschner, 1995). No obstante, la deficiencia por Cu se presenta de forma rara, encontrándose de forma restringida en aquellos suelos muy ricos en materia orgánica, la cual liga a este elemento de forma muy intensa. Aún más, el Fe puede sustituir al Cu, ya que diversas tareas ejecutadas por proteínas en cuya estructura se integra el Cu, pueden ser llevadas a cabo por proteínas en cuya estructura se integra el Fe (Yruela, 2009). Cuando lo que se presenta es un exceso de Cu, el daño puede sobrevenir ante la generación de especies reactivas de oxígeno. A consecuencia del daño que se produce sobre la maquinaria fotosintética, el Cu puede exacerbar el impacto que se genera ante intensidades lumínicas elevadas en el follaje. El exceso de Cu puede inhibir la elongación del sistema radicular, promoviendo el desarrollo de raíces laterales; también este exceso, puede conducir a la aparición de fenómenos cloróticos en las hojas e incluso la aparición de necrosis en las mismas (Yruela, 2009). A consecuencia de la intensidad de los tratamientos antifúngicos con productos cúpricos en determinadas zonas, las acumulaciones de Cu en el medio edáfico, pueden generar bloqueos en la absorción de P, Fe, y especialmente en suelos arenosos, Mg y Ca. Esta intensidad en la aplicación de fitosanitarios cúpricos, puede conducir a la aparición de fenómenos de toxicidad (Toselli et al., 2009), especialmente en viñedos instalados sobre suelos arenosos y ácidos (la aplicación de fungicidas cuya base es el S, también provocará un exacerbamiento en la acidez del suelo).

Por otra parte, si se presentan elevadas concentraciones de Cu en la baya en el momento de cosecha, se puede inhibir el desarrollo de levaduras vínicas, lo cual puede conducir a fenómenos de ralentización e incluso paradas fermentativas, lo cual redundará en una disminución de la calidad de los vinos (Tromp y De Klerk, 1988).

En el modelo de regresión “paso a paso” efectuado sobre la variable dependiente Cu P, se han obtenido como variables independientes significativas, las variables Cu L y Mg L, la primera de ellas con signo positivo y la segunda con signo negativo. El hecho de encontrar el mismo signo entre las variables Cu P y Cu L en el modelo de regresión, sugiere la existencia de una interacción sinérgica en cuanto a las concentraciones de dichos nutrientes en ambos tejidos foliares.

Por otra parte, el signo opuesto manifestado entre los nutrientes Mg y Cu, parece manifestar un comportamiento antagónico entre ambos nutrientes en cuanto a las concentraciones de los mismos en los tejidos foliares de vid. Lo anterior ya ha sido puesto de manifiesto en el modelo de regresión en el cual la variable independiente estaba constituida por Mg P (Modelo B), de tal forma que no procede repetir la misma explicación ya planteada.

Lo que si procede reseñar, es el hecho de la solidez con que se muestra la interacción, de naturaleza antagónica, entre los nutrientes Cu y Mg, pues su presencia en ambos modelos, deja de manifiesto una sensación de firmeza en la presunción de tal interacción.

4.8.5 Variable Dependiente: K Peciolo; Variables Independientes: K Limbo, Arcilla y Mg Edáfico

El catión potasio (K^+), es el más abundante en las células vegetales. En contraste con todos los demás macronutrientes, a excepción del Ca, el K no es incorporado hacia formas orgánicas sino que permanece en su forma iónica

(Robinson, 1994). En sí mismo, es uno de los principales solutos osmóticos y juega un papel clave en el crecimiento en tamaño de las células y en el movimiento estomático. Así, en el proceso de desarrollo de la planta se requiere un flujo elevado de iones K^+, para proveer de este catión a los tejidos en desarrollo. Esto significa que el crecimiento, en general, es sensible al estado nutricional de la vid en K^+. Las células también emplean el ión K^+ para neutralizar la carga negativa de los aniones, de tal forma que colaboran en el mantenimiento del potencial de membrana y contrarrestan el movimiento de otros cationes como los protones H_3O^+, los cuales resultan necesarios para la actividad de ciertas enzimas como la ATP sintetasa, así como las $H^+ - ATPasas$ y otras proteínas de transporte (Amtmann y Blatt, 2009; Clarkson y Hanson, 1980). Como añadidura a su papel en el transporte en membrana, el K^+ también estimula la carga de sacarosa en el floema con objeto de ser exportado, quizás porque con su ayuda se mantiene la neutralidad eléctrica que es necesaria para generar gradientes de pH por las $H^+ - ATPasas$ (Lalonde et al., 2004; Marten et al., 1999).

Un suministro inadecuado de K^+ reduce drásticamente el flujo de savia en el xilema, lo cual limita el desarrollo de los pámpanos y los racimos, e incrementa enormemente el riesgo de sufrir estrés hídrico. La deficiencia de potasio también suprime el transporte de azúcares en el floema, lo cual puede resultar en una acumulación de sacarosa (pero no de almidón) en las hojas, sustituyendo al K^+ como agente osmótico (Cakmak et al., 1994; Hermans et al., 2006). Esto explica no solo el por qué las raíces no pueden incrementar su desarrollo en las plantas deficientes en K^+, sino también por qué la deficiencia conlleva a una inhibición retroactiva de la fotosíntesis. Con la sacarosa atrapada en las hojas y la fotosíntesis en declive, las consecuencias para la producción de fruta y su maduración pueden ser severas. Al mismo tiempo, su movilidad en el floema, faculta al K^+ para ser su recirculación desde los órganos maduros a los jóvenes, moviéndose de forma preferencial hacia los órganos y tejidos en desarrollo (Conradie,1981b; Mpelasoka et al., 2003). Los síntomas visuales de deficiencia incluyen tonos de brillo en las hojas, especialmente bajo condiciones de elevada iluminación, seguidos de una decoloración bronceada procedente de las células muertas de la epidermis y un color amarillo pálido en los márgenes foliares. En los casos más severos, el borde del limbo foliar se enrolla hacia arriba y en ocasiones se muestra necrótico de forma previa a que la planta se despoje de las hojas (Gärtel, 1993). Estos síntomas se desarrollan de forma más rápida ante condiciones de elevada iluminación, a consecuencia de un exceso de electrones excitados conduce a un estrés oxidativo (Marschner y Cakmak, 1989). Los síntomas que se presentan en las hojas, también se manifiestan de forma más severa en las vides con una carga productiva elevada como consecuencia de la translocación de K^+ hacia las bayas en desarrollo (Gärtel, 1993) las cuales, entre floración y recolección, acumulan K^+ de una forma más rápida que cualquier otro nutriente. Dependiendo de la carga productiva, la fruta cosechada representa entre el 50 y el 75% del contenido total de K de la vid (Conradie, 1981b; Rogiers et al., 2006).

Las vides deficientes en los niveles nutricionales de K^+, también presentan una mayor susceptibilidad frente al oidio y ante posibles daños por frío en invierno (Gärtel, 1993). Es más, a consecuencia de la importancia del K^+ para la hidratación y germinación del polen, así como para el desarrollo del tubo polínico, la deficiencia de K^+ también interfiere en la polinización y fertilización, lo cual presenta como resultado un pobre cuajado. Los síntomas de deficiencia están usualmente asociados con una

acumulación de poliaminas (especialmente putrescina) en los pámpanos y hojas (Geny et al., 1997b). Ha sido propuesto que es la acumulación de esta putrescina la causa inductora de los síntomas visibles en las hojas; no obstante, aplicaciones de putrescina pueden provocar mejoras en el cuajado (Geny et al., 1997a). A medida que la deficiencia en K se muestra más severa, la putrescina puede comenzar a constituirse como el principal componente nitrogenado soluble (la causa de esta acumulación de putrescina durante la deficiencia de K es desconocida). No obstante, puesto que las poliaminas pueden bloquear los canales de cationes no selectivos e incrementar los transportadores activos $(H^+ - ATPasas)$ en las células vegetales (Kusano et al., 2008), es posible que las mismas sirvan para prevenir la acumulación compensatoria de Na^+ en ausencia de K^+.

La putrescina también se acumula en hojas, principalmente en las jóvenes vides vigorosas, durante la alternancia de parada y arranque en el crecimiento, que se desarrolla por la amplia fluctuación de las temperaturas primaverales. Esto puede conducir al conjunto de síntomas conocido como “fiebre primaveral”, cuyos síntomas son virtualmente idénticos a los que se generan ante la deficiencia de K^+. Es posible que la acumulación de putrescina sea parte de un proceso de aclimatación al frío que incrementa la aptitud de las hojas a la supervivencia frente a las gélidas temperaturas (Cuevas et al., 2008). El vínculo entre la putrescina y las bajas temperaturas puede también constituir la razón por la cual los síntomas de deficiencia en K^+ aparecen de una forma más severa ante condiciones de bajas temperaturas. En contraste con la deficiencia en potasio, los síntomas de la fiebre primaveral son confinados a las hojas adultas.

El sistema radicular responde a menudo, frente a un suministro inadecuado de K, con un desarrollo lateral; esto significa que se produce un desvio en su desarrollo gravitrópico (Ashley et al., 2006).

En nuestro modelo de regresión “paso a paso” efectuado sobre la variable dependiente K P, se han obtenido como variables independientes significativas, la variable K L y los parámetros edáficos Arcilla y Mg.

La interacción en la concentración del nutriente K en los tejidos foliares limbo y peciolo de naturaleza positiva, refleja el hecho de una dinámica unidireccional en la concentración del nutriente K en ambos tejidos. En esta línea se han manifestado, a través de sus experiencias en *Vitis vinífera* L., Cline and Bradt (1980), Morris et al. (1980), Wolf et al. (1983), Conradie y Saayman (1989b), García et al. (1999), Poni et al. (2003) y Delgado et al. (2004).

Respecto a la interacción negativa hallada en el modelo entre el nutriente K y el parámetro edáfico arcilla, concuerda con lo expuesto por Cees y Wim (2009), quienes exponen como a medida que el contenido de arcilla del suelo se ve incrementado, el catión K^+ es intensamente retenido, produciéndose un intercambio en el complejo con los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+}, lo cual redundará en una disminución de la absorción de K por parte de la planta y su consecuente reducción en las concentraciones existentes en los tejidos vegetales. Conradie y Saayman (1989), a través de sus experiencias sobre *Vitis vinífera* L. var. Chenin Blanc, observaron como la fertilización potásica, y por ende, las concentraciones en los tejidos vegetales de K, se veía afectada, entre otros factores, por el contenido en arcilla del medio de cultivo.

La interacción entre los nutrientes K P y Mg presenta naturaleza positiva. Sin embargo, de forma mayoritaria, la literatura científica se refiere a una interacción de tipo antagonista entre ambos nutrientes. Así, la interacción antagonista entre el ión K^+ y el Mg^{2+}, a propósito de la absorción de nutrientes por parte de la planta, ha sido ampliamente publicada; Johnson et al. (1968) a través de sus experiencias en cebada, Fageria (1983) en base a sus experiencias en arroz y Dibb y Thompson (1985), se han manifestado en esta línea. Una interacción competitiva entre el K^+ y el Mg^{2+} a consecuencia de propiedades fisiológicas de ambos iones, ha sido publicada por Johnson et al. (1968) a partir de sus experiencias sobre cebada y Fageria (1983) a partir de sus experiencias en arroz. De igual forma, Ologunde y Sorensen (1982), empleando un medio de cultivo arenoso para sorgo, y a través del manejo de diferentes concentraciones de K^+ y Mg^{2+}, pudo contrastar el hecho de que el ión K^+presentaba un efecto antagónico sobre las concentraciones de Mg^{2+} en los tallos de sorgo, pero el efecto que el ión Mg^{2+} presentaba sobre el ión K^+ era ligeramente antagonista o no había efecto alguno. Huang et al. (1990), a través de sus experiencias sobre trigo, observó como la translocación neta de Mg^{2+} desde el sistema radicular hacia la parte aérea, se veía deprimida a consecuencia del incremento de la concentración de K^+ en el sistema radicular. Otras posturas que se adhieren a esta interacción de tipo antagónico, son las de Spear et al. (1978) a partir de sus experiencias sobre girasol y maíz, y Christenson et al. (1973).

Continuando con experiencias que confirman la interacción antagonista entre K y Mg, hay que citar a Morris y Cawthon (1982), quienes observaron esta interacción antagónica a través de sus experiencias sobre *Vitis labrusca* L. En esta misma línea se manifiesta Wolf et al. (1983), quien a través de sus experiencias en *Vitis vinífera* L. var. Seyvel Blanc, observó una disminución en la concentración de K en los tejidos foliares como resultado de un incremento en las concentraciones de Mg. En la misma línea se postulan Morris, Sims y Cawthon (1983) a través de sus ensayos sobre *Vitis labrusca* L. var. Concord, Dundon, Smart y McCarthy (1984) en sus experiencias sobre *Vitis vinífera* L. var. Shiraz, Conradie y Saayman (1989b) en sus experiencias sobre *Vitis vinífera* L. var. Chenin Blanc y García et al. (2001), a través de sus ensayos sobre *Vitis vinífera* L. var. Negrette.

Por otra parte, Gluhic et al. (2009), en sus ensayos sobre *Vitis vinífera* L. var Sauvignon Blanc, observaron como aplicaciones foliares de Mg no provocaban un efecto significativo sobre la concentración de K en los tejidos foliares, aunque las correlaciones halladas entre ambos nutrientes por los investigadores, presentaban naturaleza negativa.

Si recordamos los valores hallados en el test-t para los coeficientes de regresión, en el caso de la variable independiente Mg suelo, la afirmación de su contribución significativa para el modelo se encontraba muy cerca de la barrera del nivel crítico establecido de p = 0,05, y a tenor de lo planteado anteriormente, una gran evidencia de fuentes bibliográficas que inciden en una interacción antagónica entre los nutrientes K y Mg en la nutrición vegetal, la participación del Mg con signo positivo en el modelo, puede ponerse en entredicho.

4.8.6 Variable Dependiente: Mn Peciolo; Variable Independiente: Mn Limbo

Este elemento únicamente puede ser absorbido por el sistema radicular de las plantas en la forma iónica (Mn^{2+}), pudiendo ser transportado tanto a través del xilema como del floema (Pittman, 2005). En las bayas de vid, la concentración de Mn disminuye durante el período de maduración, de forma similar a los elementos no móviles a través del floema como el Ca y el Zn (Rogiers et al., 2006). El Mn puede prestar servicio como antioxidante, siendo oxidado desde la forma Mn^{2+} a la forma Mn^{3+}, siendo también un componente estructural de determinadas enzimas antioxidantes, así como de las enzimas que actúan en la fotosíntesis, fracturando las moléculas de agua (Pittman, 2005). Por otro lado, el Mn es requerido por enzimas como la glucosiltransferasa, la cual liga moléculas de glucosa a fenoles y otros componentes (Marschner, 1995). Por lo tanto, la deficiencia de Mn puede incrementar la sensibilidad de los tejidos vegetales frente al estrés oxidativo, el cual puede ser generado por diversas situaciones de estrés medioambiental. Los síntomas de deficiencia son, de forma consecuente, más severos en las hojas expuestas a una iluminación directa ("sobrecarga" energética). Aparecen fenómenos de clorosis en respuesta a una insuficiente disponibilidad de Mn en primer lugar, en las porciones basales de los pámpanos, al poco tiempo de manifestarse el estado fenológico de brotación. La clorosis se manifiesta a modo de mosaico, y las hojas posteriormente adquieren tonos rojizos o bronces, mostrándose retraso en la maduración de las bayas (Gärtel, 1993). No obstante, la deficiencia por Mn es enmascarada en muchos suelos por el desarrollo simultáneo de una clorosis inducida por la deficiencia de Fe (Gärtel, 1993). El exceso de Mn induce estrés oxidativo y ocasiona como sintomatología la existencia de una limitación en el desarrollo de los pámpanos, clorosis foliar y la aparición de lesiones necróticas (Kochian et al., 2004).

En esta ocasión, el modelo de regresión "paso a paso" efectuado sobre la variable dependiente Mn P, nos ofrece, exclusivamente como variable independiente significativa, la variable Mn L.

La interacción en la concentración del nutriente Mn en los tejidos foliares limbo y peciolo es de naturaleza positiva, lo cual refleja el hecho de una dinámica unidireccional en la concentración del nutriente Mn en ambos tejidos.

4.8.7 Variable Dependiente: B Peciolo; Variables Independientes: B Limbo y P Limbo

Como anión borato $[B(OH)_4^-]$, aparece ligado intensamente a las pectinas, por lo que se encuentra involucrado en la formación o interconexión de la malla de pectinas en las paredes celulares, las cuales respaldan la función del ión Ca^{2+} en las paredes celulares y son esenciales para el desarrollo foliar (O'Neill et al., 2004). Por lo tanto, la mayor parte del B en las plantas se encuentra localizado en el apoplasto, pudiendo ser el B continuamente transportado a las zonas de desarrollo vegetal con el objeto de dar sustento a la estructura de la pared celular y a su desarrollo. Aún más, los requerimientos de B por parte de los tubos polínicos son especialmente elevados ya que son ricos en pectinas. El B se encuentra en el suelo disponible para la planta, como ácido bórico $[B(OH)_3]$; así, difiere de otros microelementos en el hecho de existir como molécula con carga neutra a pH fisiológico, siendo su paso hacia el

interior vegetal principalmente por simple difusión, especialmente a elevadas concentraciones en el medio externo (Clarkson y Hanson, 1980; Reid, 2001). Por lo tanto, el sistema radicular de la planta, puede no ser capaz de excluir B que se encuentre en concentraciones excesivas, con el consiguiente riesgo de padecer toxicidad por B, que proviene de la aptitud del B para unirse a las moléculas de ATP y NAD(P)H. Además de la difusión pasiva, el transporte activo hacia el sistema radicular y el xilema, probablemente suceda cuando la concentración de B en la solución del suelo se encuentre a niveles bajos (Reid, 2001; Takano et al., 2008).

Los síntomas de toxicidad por B, son semejantes a los que se desarrollan frente a la deficiencia por este mismo elemento, siendo el rango de concentraciones entre la deficiencia y la toxicidad muy estrecho (Takano et al., 2008). El acopio de B en los limbos y peciolos foliares, es continuo a lo largo del ciclo de desarrollo anual de la vid (Christensen, 1984), por lo que, en contraste con otros nutrientes, la concentración de B es mayor al final de este ciclo de desarrollo y en las hojas adultas. La acumulación de B, también es continua en las bayas de vid a lo largo de su desarrollo y período de maduración (Rogiers et al., 2006). La toxicidad por B puede ser inducida por una fertilización indebida, siendo especialmente peligrosa esta circunstancia, en las regiones áridas. La carencia de B, se muestra con frecuencia en los suelos ácidos (pH<4,5), especialmente ante condiciones de sequía, aconteciendo rápidamente fenómenos de cese en la división celular, mientras que la expansión celular se cree que no se ve afectada (Clarkson y Hanson, 1980). No obstante, la inhibición de la actividad en el meristemo, conduce a una reducción en el desarrollo de los brotes y el sistema radicular, desarrollándose en los brotes el fenómeno de internudos “abombados”, mientras que los peciolos, se muestran gruesos y cortos (Gärtel, 1993). Estos síntomas, generalmente se encuentran confinados en los tejidos jóvenes; aunque el B puede movilizarse a través del floema, aparentemente no puede recircular desde las hojas maduras. Una escasa productividad de las yemas, puede surgir como un efecto arrastrado de una insuficiente disponibilidad de B en el desarrollo del primordio durante el ciclo previo de desarrollo anual (Gärtel, 1993).

Ya que el B es importante para la germinación del polen y el desarrollo del tubo polínico, la deficiencia de este elemento interfiere con el proceso de fertilidad (May, 2004; O’Neill et al., 2004). Todo esto resulta en un cuajado deficiente, conteniendo los racimos bayas pequeñas y carentes de semillas, junto a bayas con un desarrollo normal (Gärtel, 1993). La privación de B, probablemente también induce daños por radicales libres de oxígeno en las células, de tal manera que una tasa elevada de iluminación, exacerbará los síntomas de la deficiencia en B (Marschner y Cakmak, 1989).

En esta ocasión, el modelo de regresión “paso a paso” efectuado sobre la variable dependiente B P, nos ofrece como variables independientes significativas, las variables B L y P L.

La interacción en la concentración del nutriente B en los tejidos foliares limbo y peciolo es de naturaleza positiva, lo cual refleja el hecho de una dinámica unidireccional en la concentración del nutriente B en ambos tejidos.

Por su parte, la interacción entre los nutrientes B P y P L presenta naturaleza negativa, lo cual refleja la existencia de un efecto de naturaleza antagónica entre

ambos nutrientes. A este respecto, Gupta (1993), indica que el efecto que el nutriente P presenta sobre la absorción de B por parte de las plantas no está en absoluto nada claro, de tal forma que el efecto del P sobre la absorción de B en los vegetales puede verse incrementada, reducida o no mostrar ningún tipo de efecto. Gunes y Alpasplan (2000), inciden en el efecto antagónico, pues a través de sus experiencias en maíz, observaron como el B empezaba a mostrar niveles tóxicos en la planta a medida que las condiciones de deficiencia de P se mostraban patentes, mientras que las aplicaciones de P aliviaban las condiciones de toxicidad por B.

Por su parte, Downton y Hawkwer (1980), observaron, a través de sus experiencias *Vitis vinífera* L. var. Cabernet Sauvignon, el efecto que el nutriente B presentaba sobre su desarrollo y contenido mineral. Los resultados obtenidos por estos investigadores, mostraron como el B presentaba una interacción de naturaleza antagónica con el P, reduciendo la concentración de este último en el sistema radicular y en los tejidos foliares.

4.8.8 Variable Dependiente: P Peciolo; Variable Independiente: Ca Edáfico

El anión fosfato $(H_2PO_4^-$, a menudo abreviado como P_i de fósforo inorgánico), es el principal sustrato en términos energéticos para el metabolismo de la planta (las moléculas de ATP contienen tres grupos fosfato), en la síntesis de ácidos nucleicos (como grupos fosfato en el ADN y en el ARN), en las membranas (como constituyente de los fosfolípidos), en carotenoides y giberelinas. También juega un papel importante en la fotosíntesis (vía fotofosforilación), en la respiración y en la regulación de un amplio número de enzimas. Más aún, la fosforilación de las acuaporinas regula el transporte del agua a través de las membranas: las acuaporinas fosforiladas son activas (Maurel et al., 2008). Además, el pirofosfato inorgánico $(PP_i; P_2O_7^{4-})$, un producto derivado de la producción de almidón, es esencial para las funciones que desarrolla el floema (Koch, 2004). El patrón estacional de absorción de P procedente de la solución del suelo por las vides, refleja más o menos, la misma dinámica que el patrón de absorción de N (Conradie, 1980).

El P es uno de los nutrientes esenciales que menor disponibilidad presenta en el medio edáfico, ya que, es extremadamente insoluble, y por lo tanto, poco móvil, como consecuencia de su afinidad a cationes como Ca^{2+}, Mg^{2+} y Al^{3+}, con los que forma compuestos insolubles, y a su conversión a formas orgánicas en el suelo (Raghothama, 1999).

El sistema radicular realiza la absorción de P principalmente en la forma $H_2PO_4^-$ (Grossman y Takahashi, 2001). La disminución en la disponibilidad del P, conduce a una disminución en el desarrollo de las raíces principales y un incremento en el desarrollo de raíces laterales y pelos radiculares (Hermans et al., 2006; López-Bucio et al., 2003; Nibau et al., 2008; Osmont et al., 2007; Raghothama, 1999). Este giro en el patrón de desarrollo radicular puede estar mediado por una acumulación de auxinas, presentándose como efecto resultante un incremento en la relación sistema radicular:órganos de madera aéreos (Malamy, 2005; Potters et al., 2009). Aunque esta estrategia adaptativa permite a las vides explorar regiones del suelo con mayor riqueza en P, también puede hacer a las vides más vulnerables frente a situaciones de estrés hídrico. Lo anterior puede ser originado, porque la respuesta está limitada a situaciones en las que todo el sistema radicular, más que un porcentaje del mismo,

experimenta deficiencia en P (Schachtman y Shin, 2007). Las raíces de ciertas especies vegetales con deficiencia en P, exudan ácidos orgánicos como citrato y malato, acidificando la rizosfera y solubilizando formas fosfatadas (Dakora y Phillips, 2002; Hammond y White, 2008; Marschner, 1995). Las vides, también pueden apoyarse en las micorrizas para incrementar su capacidad de absorción de P, y las vides con deficiencias nutricionales en P incrementan de forma ostensible la colonización de sus raíces por micorrizas a través de la exudación de sesquiterpenos que ayuden al establecimiento del contacto entre las raíces y los hongos (Bais et al., 2006).

Un descenso en el número y tamaño de las hojas es uno de los más tempranos y fiables síntomas de deficiencia en P. Un escaso suministro de P limita la división celular, restringiendo la iniciación foliar en los meristemos apicales de los tallos y la expansión de los limbos de las hojas más jóvenes (Chiera et al., 2002). La reducción en la división celular, puede ser también responsable de la inhibición de la iniciación y diferenciación de los racimos, así como del desarrollo de tallos laterales en las vides deficientes en P (Gärtel, 1993; Grant y Matthews, 1996a; Skinner et al., 1988). Aunque como nutriente móvil en el floema, el P puede ser recirculado desde las hojas maduras hacia los órganos en desarrollo, la deficiencia en P restringe la actividad como sumidero de los meristemos de los tallos, y esta disminución resultante en la demanda de asimilados por las regiones en desarrollo, genera una acumulación de azúcares y almidón en las hojas adultas (Hermans et al., 2006; Kochian et al., 2004). La deficiencia de P reduce la actividad en las hojas adultas como fuente de P para su redistribución, a consecuencia de una disminución de la actividad fotosintética y del fraccionamiento de asimilados, debido en parte a un contenido insuficiente de P_i para la síntesis de ATP, y en parte a que las hojas no pueden activar de forma plena su rubisco (Paul y Foyer, 2001; Woodrow y Berry, 1988). Las hojas deficientes en P mantienen un tamaño pequeño y un color verde grisáceo oscuro (Gärtel, 1993; Hammond y White, 2008). Las hojas con deficiencia severa de P pueden tomar un tono rojizo debido a la producción de antocianos como consecuencia de la acumulación de azúcares que no son exportados desde las hojas (Grossman y Takahashi, 2001; Lillo et al., 2008). Esta pigmentación, probablemente, es una reacción fotoprotectora, ya que la disminución de la fotosíntesis está asociada con un exceso de energía que resulta en un estrés oxidativo (Feild et al., 2001; Hoch et al., 2003).

En esta ocasión, el modelo de regresión “paso a paso” efectuado sobre la variable dependiente P P, nos ofrece, exclusivamente como variable independiente significativa, la variable edáfica Ca, mostrando el citado modelo una interacción de naturaleza positiva entre ambos nutrientes.

A este respecto, han sido halladas interacciones a nivel edáfico entre las concentraciones de aniones y cationes, de tal forma que las concentraciones de unos pueden afectar a la absorción por parte de la planta de los otros. En esta línea, De Kreij (1996) y Voogt y Sonneveld (2004), a través de sus experiencias en tomate, observaron una interacción de tipo sinérgico, a nivel de absorción por parte de la planta, entre los nutrientes P y Ca. Por su parte, Conradie y Saayman (1989b), por medio de sus experiencias llevadas a cabo sobre *Vitis vinífera* L. var. Chenin Blanc, observaron que se producía una interacción de tipo sinérgica entre ambos nutrientes.

No obstante, tanto Fageria et al. (1995) a través de sus experiencias en arroz y maíz, como Fageria y Zimmermann (1998) por medio de sus experiencias en arroz, observaron como en aquellos medios cuyo contenido en caliza se veía incrementado, y por ende, el contenido en Ca disponible para la planta aumentaba, se producía una interacción negativa con la absorción de P del medio edáfico por parte de las plantas cultivadas, de tal forma que las concentraciones de P en los tejidos vegetales disminuían, lo cual se muestra en contraposición a lo reflejado por el modelo en discusión. En esta dirección son propuestas las conclusiones de Heaseler et al. (1980), a través de sus experiencias efectuadas sobre Vitis labrusca L. var. Concord, pues hallaron la existencia de una interacción de naturaleza negativa entre ambos nutrientes.

Friesen et al. (1980), observaron, a través de sus experiencias en *Phaseolus vulgaris* L., un incremento en la absorción y concentración de P en los tejidos vegetales como respuesta a la aplicación de Ca, en forma de enmiendas de calizas, sobre los suelos objeto de cultivo. Los autores reflejan en la discusión de sus resultados, que la mejora en la absorción de P por parte de las plantas cultivadas, se encuentra muy influenciada en sus ensayos por una disminución de los niveles de toxicidad de Al en el medio. En esta línea inciden Sumner y Farina (1986), quienes reflejan que, en la mayor parte de las ocasiones, las interacciones sinérgicas acontecidas entre los nutrientes P y Ca, tienen lugar a consecuencia del efecto que presenta el Ca incorporado al medio, en forma de enmienda caliza, sobre la toxicidad por Al, la cual genera un efecto inhibidor sobre el desarrollo del sistema radicular.

4.8.9 Variable Dependiente: Mn Peciolo; Variables Independientes: Mn Limbo, Ca Edáfico y C.E.

La importancia del nutriente Mn en *Vitis vinífera* L., ya ha sido expuesta anteriormente, de tal forma que no resulta procedente expresarse en los mismos términos de forma repetitiva.

En este nuevo modelo de regresión “paso a paso” efectuado sobre la variable dependiente Mn P, se han obtenido como variables independientes significativas, la variable Mn L y los parámetros edáficos C.E. y Ca.

La interacción en la concentración del nutriente Mn en los tejidos foliares limbo y peciolo de naturaleza positiva, refleja el hecho de una dinámica unidireccional en la concentración del nutriente Mn en ambos tejidos.

En el caso de la interacción mostrada por el modelo entre los nutrientes Mn y Ca, la misma es de naturaleza negativa. En esta línea se muestran los investigadores Maas et al. (1969) , Robson y Loneragan (1970) y Novais et al. (1989). En el caso de Novais et al. (1989), observaron como la absorción de Ca se veía deprimida ante el incremento de la concentración de Mn en el medio de cultivo. Por su parte, tanto Maas et al. (1969), como Robson y Loneragan (1970), indican como la absorción de Mn por parte de la planta, y su consecuente concentración en los tejidos vegetales, es inhibida a consecuencia de la adición de una serie de cationes divalentes, entre los cuales se encuentra el ión Ca^{2+}. Pearson y Goheen (2001), indican como las deficiencias de Mn en *Vitis* spp., se presentan, principalmente, en suelos cuya reacción es de naturaleza alcalina, caracterizados, en una gran mayoría de las

ocasiones, por presentar elevadas concentraciones de Ca^{2+} en el medio de cultivo.

Por otra parte, el modelo refleja la existencia de una interacción de naturaleza positiva entre la concentración de Mn en peciolo y el parámetro edáfico C.E., aunque no debemos de olvidar que por la naturaleza de nuestra ecuación de regresión lineal, únicamente los valores de C.E. superiores a 1 dS/m, supondrían un incremento de la concentración de Mn en nuestra ecuación. Jackson et al. (1966) a través de experiencias en maíz, y Krishnamurti y Huang (1992) por medio de estudios llevados a cabo sobre suelos de diferente taxonomía, han citado como la presencia de ciertas sales $(KCl, NaCl \text{ y } CaCl_2)$, provocan un incremento de los niveles de biodisponibilidad del Mn; para este fenómeno, Westermann et al. (1971), propone como hipótesis explicativa la existencia de reacciones redox en las cuales se ven involucrados $Mn^{4+}, Mn^{3+} \text{ y } Cl^{-}$. Khattak et al. (1989), preconiza que el proceso de intercambio iónico, es el principal mecanismo responsable del incremento de biodisponibilidad en el Mn inducido por un aumento de la concentración salina. La hipótesis de que un incremento en la concentración de sales solubles ejerza una influencia positiva sobre la biodisponibilidad del Mn, se ve reforzada por las conclusiones obtenidas por Krishnamurti y Huang (1992) y Petrie y Jackson (1984) en sus investigaciones, que observaron esta interacción de naturaleza positiva mediante el incremento de la concentración de KCl en distintos suelo objeto de cultivo. Los primeros, atribuyen a fenómenos de complejación el incremento de biodisponibilidad del Mn, mientras que los segundos hacen referencia fenómenos de tipo redox en los que se ven involucrados el Mn y el Cl. Sin embargo Klein et al. (2000), indican en sus estudios sobre *Vitis* spp., que los procesos de irrigación generan un incremento en el movimiento de K desde las partículas de arcilla hacia la solución del suelo, de tal forma que se facilita su absorción por el sistema radicular y su posterior translocación, a tejidos vegetales de los órganos aéreos.

4.9 EVALUACIÓN DE FIABILIDAD DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN

Por último, realizamos una valoración final conjunta de la fiabilidad de todos los modelos de regresión múltiple obtenidos, para las diversas variables “nutrientes peciolo” empleadas como variables dependientes (**Tabla nº 19**). En esta valoración, además de los parámetros estadísticos de contraste, y con el objeto de vincularlos al 95% de los errores en la predicción, utilizamos los rangos de concentración de nutrientes minerales en peciolos de vid, en el estado fenológico de envero, aportados por los siguientes autores: Cook y Winkler (1976), Christensen et al. (1978), Fregoni (2005) y Romero et al. (2005).

MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE	R^2	$< 95\%$ *ERRORES*	MULTICOLINEALIDAD	VALORES RESID. TIPIFICADOS[1]	HISTOGRAMA RESID. TIPIFICADOS[2]	DISPERSIÓN PRON. Vs RESID.[3]	VALORACIÓN FINAL
$Ca\ P = 0{,}589 + 0{,}639\ Ca\ L - 0{,}02\ Fe\ L$	0,47	0,42 %	AUSENCIA	POCO FIABLE	ADECUADO	ADECUADO	**POCO FIABLE**
$Mg\ P = 0{,}14 + 1{,}86\ Mg\ L - 0{,}02\ Cu\ L$	0,61	0,17 %	AUSENCIA	POCO FIABLE	ADECUADO	ADECUADO	**POCO FIABLE**
$Zn\ P = 11{,}66 + 101{,}18\ Mg\ L - 1{,}28\ Cu\ L$	0,40	14,1 mg/kg	AUSENCIA	ADECUADO	ADECUADO	ADECUADO	**POCO FIABLE**
$Cu\ P = 4{,}53 + 0{,}48\ Cu\ L - 13{,}26\ Mg\ L$	0,43	2,6 mg/kg	AUSENCIA	POCO FIABLE	ADECUADO	ADECUADO	**POCO FIABLE**
$K\ P = 3{,}63 + 1{,}12\ K\ L - 2{,}06\ Lg10Arcilla + 0{,}58\ Lg10Mg$	0,49	0,87 %	AUSENCIA	ADECUADO	ADECUADO	ADECUADO	**POCO FIABLE**
$Mn\ P = 2{,}00 + 1{,}52\ Mn\ L$	0,78	152,36 mg/kg	AUSENCIA	ADECUADO	ADECUADO	ADECUADO	**CUESTIONABLE**
$B\ P = 14{,}47 + 0{,}53\ B\ L - 75{,}03\ P\ L$	0,43	17,74 mg/kg	AUSENCIA	POCO FIABLE	ADECUADO	ADECUADO	**POCO FIABLE**
$P\ P = 0{,}08 + 0{,}12\ Lg10Ca$	0,18	0,13 %	AUSENCIA	ADECUADO	ADECUADO	ADECUADO	**POCO FIABLE**
$Mn\ P = 281{,}22 + 1{,}38\ Mn\ L - 165{,}57\ Lg10Ca + 116{,}40\ Lg10C.E.$	0,83	14,03 mg/kg	AUSENCIA	ADECUADO	ADECUADO	ADECUADO	**COMPETENTE**

[1] Diagnóstico de los valores residuales estandarizados
[2] Histograma de Residuos tipificados
[3] Gráfico de dispersión de Pronósticos tipificados Vs. Residuos tipificados

Tabla nº 19: Valoración de fiabilidad para los diversos modelos hallados mediante el procedimiento de "regresión múltiple"

4. CONCLUSIONES

1. Se constata la gran influencia e importancia que presenta el pH de los suelos, sobre la biodisponibilidad de los nutrientes minerales presentes en los mismos.

2. Mediante el análisis de correlación canónica efectuado a los parámetros edáficos, se ha observado que ejerce una mayor influencia la concentración de Al^{3+}, sobre las variables pH, Calcio y Magnesio, correspondientes al componente definido como “reacción del suelo”, que los niveles de materia orgánica presentes en los suelos, lo que es de gran importancia desde el punto de vista del manejo de estos suelos ácidos.

3. Tanto en limbos como en peciolos de *Vitis vinífera* L. cv. Prieto Picudo, ha aparecido de forma reiterada las siguientes relaciones entre nutrientes minerales: P/Mn con naturaleza antagónica, y por otro lado Ca/Mg y Zn/B, con un carácter sinérgico.

4. En el análisis de regresión lineal efectuado, se han obtenido escasas interacciones significativas entre los parámetros edáficos y los nutrientes minerales de los tejidos vegetales del limbo y del peciolo.

5. En las concentraciones de nutrientes minerales de sarmientos de *Vitis vinífera* L. cv. Prieto Picudo que se estudiaron de forma aislada, no ha sido posible confirmar patrones de asociación entre ellos en las diferentes zonas en que los sarmientos se subdividieron.

6. Tanto en las concentraciones de nutrientes minerales de sarmientos de *Vitis vinífera* L. cv. Prieto Picudo, como en limbos y peciolos, se observa el comportamiento sinérgico de los nutrientes Ca/Mg y K/Mn.

7. Se confirma, que cada uno de los nutrientes objetos de estudio, presenta una interacción a nivel de limbo y peciolo unidireccional, de tal forma que en aquellos estudios cuyo enfoque sea la evolución nutricional, ambos tejidos vegetales pueden resultar igualmente efectivos y explicativos.

8. Se ha constatado que los nutrientes minerales Mg y Cu de los tejidos vegetales de *Vitis vinífera* L. cv. Prieto Picudo, aparecen con una interacción antagónica y significativa, lo cual reviste gran importancia, dada la escasez del nutriente Mg en estos suelos, y los continuos tratamientos con base cúprica que actualmente se realizan.

5. BIBLIOGRAFÍA

Abadía, J., Rao, I. M. y Terry, N. Changes in leaf phosphate status have only small effects on the photochemical apparatus of sugar beet leaves. *Plant Science*, 1987, 50, p. 49 – 55.

Achen, C. H. *Interpreting and using regression*. Thousand Oaks, California: SAGE Publications, 1982.

Adams, F. Crop response to lime in the southern United States. En: F. Adams, ed. *Soil Acidity and Liming*, 2nd ed. Editor: Adams, F. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1984, p. 211- 265.

Adams, F., y Wear, J. T. Manganese toxicity and soil acidity in relation to crinkle leaf of cotton. *Soil Science Society of America. Proc*eedings, 1957, 21, p. 305 – 308.

Aitken, R. L. y Moody, P. W. Interrelations between soil pH measurements in various electrolytes and soil solution pH in acidic soils. *Australian Journal of Soil Research,* 1991, 29, p. 483 – 491.

Ali, S. M. E. *Influence of cations on aluminum toxicity in wheat* (*Triticum aestivum*). PhD dissertation, Oregon State University, 1973.

Allen, B.L. y Hajek, B.F. Mineral occurrence in soil environments. En: *Minerals in Soil Environments*, 2nd ed. Editores: Dixon, J.B. y Weed, S.B. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1989, p. 199 – 278.

Alloway, B. J. *Zinc in soils and crop nutrition.* Brussels, Belgium: International Zinc Association, 2004.

Amtmann, A. y Blatt, M. R. Regulation of macronutrient transport. *New Phytologist*, 2009, 181, p. 35 – 52.

Andersson, A. Heavy metals in Swedish soils; on their retention, distribution and amounts. *Swedish Journal of Agricultural Research,* 1977b, 7, p. 7 – 20.

Apel, K. y Hirt, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55, p. 373 – 399.

Asher, C. J. Beneficial elements, functional nutrients, and possible new essential elements. En: *Micronutrients in Agriculture*. Editores: Mortvedt, J. J. et al. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1991, vol. 4, p. 703 – 723.

Ashley, M. K., Grant, M. y Grabov, A. Plant responses to potassium deficiencies: a role for potassium transport proteins. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57, p. 425 – 436.

Aulakh, M. S., Doran, J. W. y Mosier, A. R. Soil denitrification: Significance, measurement, and effects of management. *Advances in Soil Sciences*, 1992, 18, p. 1 - 57.

Bais, H. P. et al. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual Review of Plant Biology*, 2006, 57, p. 233 – 266.

Baker, D. A. y Milburn, J. A. Lateral movement of inorganic solutes in plants. *Nature*, 1965, 205, p. 306 – 307.

Baligar, V. C., Fageria, N. K. y He, Z. L. Nutrient use efficiency in plants: An overview. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32, p. 921 – 950.

Baligar, V. C. et al. Bioassay technique to assas acid soil contains for growth of wheat (*Triticum aestivum*) roots. En: *Plant Nutrition Phisiology and Applications.* Editor: van Beusichen, M.C. Kluwer Academic Publisheers, 1990, p. 419 – 424.

Barber, S. A. *Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach*, 2nd edition. New York: Wiley & Sons, 1995.

Barber, S.A. y Ozanne, O.G. Audioradiographic evidence for the differential effect of four plant species in altering the calcium content of the rhizosphere soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1970, 34, p. 635 – 637.

Barceló, J. y Poschenrieder, Ch. Fast root growth responses, root exudates and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: a review. *Environmental and Experimental Botany*, 2002, 48, p. 75 - 92.

Barker, A. V. y Pilbeam, D. J. *Handbook of plant nutrition*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2007.

Barnett, V. y Lewis, T. *Outliers in statistical data*. New York, New York: Wiley 1978.

Barrow, N.J. Modeling the effect of pH on phosphate sorption by soils. *Journal of Soil Science*, 1984, 35, p. 283 – 297.

Barrow, N. J. Testing a mechanistic model: IV. Describing the effects of pH on zinc retention by soils. *Journal of Soil Science,* 1986, 37, p. 295 – 302.

Bates, T.R. y Lynch, J.P. Stimulation of root hair elongation in Arabidopsis thaliana by low phosphorus availability. *Plant, Cell & Environment*, 1996, 19, p. 529 – 538.

Bavaresco, L., Fregoni, M. y Fraschini, P. Investigations on iron uptake and reduction by excised roots of different grapevine rootstocks and a *Vitis vinifera* cultivar. *Plant and Soil*, 1991, 130, p. 109–113.

Bertamini, M. y Nedunchezhian, N. Grapevine growth and physiological responses to iron deficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, 28, p. 737 – 749.

Bertsch, P. M. y Thomas, G. W. Potassium status of temperate region soils. En: *Potassium in agriculture*. Editor: Munson, R. D. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1985, p. 131 – 162.

Bennett, W. F. 1993. Plant nutrient utilization and diagnostic plant symptoms. En: *Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants*. Editor: Bennett, W. F. St. Paul, Minnesota: The American Phytopathological Society, American Phytopathological Society Press, 1993, p. 1 – 7.

Bingham, F. T. et al. Boron adsorption characteristics of selected amorphous soils from Mexico and Hawaii. *Soil Science Society of America Proceedings,* 1971*,* 35, p. 546 – 550.

Blanke, M. M., Pring, R. J. y Baker, E. A. Structure and elemental composition of grape berry stomata. *Journal of Plant Physiology*, 1999, 154, p. 477 – 481.

Bloom, P. R. Metal-organic matter interactions in soil. En:. *Chemistry in the soil environment.* Editores Dowdy, R. H. et al. Madison, Wiscosin: American Society of Agronomy, 1981, p. 129 – 149.

Bloom, P. R. y McBride, M. B. Metal in binding and exchange with hydrogen ions in acid-washed peat. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, 43, p. 687 – 692.

Bloom, A. J., Chapin, F. S. y Mooney, H. A. Resource limitation in plants; an economic analogy. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1985, 16, p. 363 – 392.

Bohn, H. L., McNeal, B. L. y O'Connor, G. A. *Soil chemistry. 3rd Edition*. New York: John Wiley and Sons, 2001.

Bolan, N. S. y Hedley, M. J. Role of carbon, nitrogen, and sulfur cycles in soil acidification. En: *Handbook of soil acidity*. Editor: Z. Rengel. New York: Marcel Dekker, 2003, p. 29 – 56.

Bolan, N. S. et al. Surface charge and solute interactions in soils. *Advances in Agronomy*, 1999, 67, p. 88 – 141.

Bowen, J. E. Absorption of copper, zinc and manganese by sugarcane tissue. *Plant Physiology,* 1969, 44, p. 255 – 261.

Brady, N. C. y Weil, R. R. *The nature and properties of soils*, 13th edition. Upper Sadder River, New Jersey: Prentice Hall, 2002.

Brancadoro, L. et al. Mechanisms of Fe-efficiency in roots of *Vitis* spp. In response to iron deficiency stress. *Plant and Soil*, 1995, 171, p. 229 – 234.

Briat, J. F. y Lobréaux, S. Iron transport and storage in plants. *Trends in Plant Science*, 1997, 2, p. 187 – 193.

Broadley, M. R. et al. Zinc in plants. *New Phytologist*, 2007, 173, p. 677 – 702.

Brouwer, R. Nutritive influences on the distribution of dry matter in the plant. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1962, 10, p. 399 – 408.

Brown, G., Mitchell, D.T. y Stock,W.D. Atmospheric deposition of phosphorus in a coastal fynbos ecosystem in the south-western Cape, South Africa. *Journal of Ecology*, 1984, 72, p. 547 – 551.

Brown, P. H., Welch, R. M. y Cary, E. E. Nickel: a micronutrient essential for higher plants. *Plant physioogy,* 1987, 85, p. 801 – 803.

Brown, P. H. y Hu, H. Does boron play only a structural role in the growing tissues of higher plants?. *Plant and Soil,* 1997, 196, p. 211 – 215.

Buchanan, B.B., Gruiseem, W. y Jones, R.L. *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. Rockville, Maryland: American Society of Plant Physiology, 2000, p. 2 – 50, 52 – 108, 110 – 158, 202 – 258, 930 – 987, 1204 – 1249, 1250 – 1318.

Burkhead, J. L. et al. Copper homeostasis. *New Phytologist*, 2009, 182, p. 799 – 816.

Burnell, J. N. The biochemistry of manganese in plants. En*: Manganese in soils and plants*. Editores: Graham, R. D., Hannam, R. J. y Uren, N. C. Dordrecht: The Kluwer Academic Publishers, 1988, p. 125 – 137.

Cakmak, I. y Kirkby, E. A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiologia Plantarum*, 2008, 133, p. 692 – 704.

Cakmak, I. y Engels, C. Role of mineral nutrients in photosynthesis and yield formation. En: *Mineral nutrition of crops: Fundamental mechanisms and implications*. Editor: Rengel, Z. New York: The Haworth Press, 1999, p. 141 – 168.

Cakmak, I., Hengeler, C. y Marschner, H. Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants. *Journal of Experimental Botany*, 1994, 45, p. 1251 – 1257.

Camberato, J. J. y Pan, W. L. Bioavailability of calcium, magnesium, and sulfur. En: *Handbook of soil science*. Editor: Sumner, M. E. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2000, p. 53 – 69.

Canavos, G. C. *Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y métodos*. Naucalpan de Juárez, Mexico: McGraw-Hill/Interamericana de México, 1988.

Carbonneau, A. Stérilités male et femelle dans le genre Vitis. II. Conséquences en Génétique et sélection. *Agronomie*, 1983, 3, p. 645 - 649.

Carson, C. D. y Dixon, J. B. Acidity. En: *The Encyclopedia of Soil Science*, part 1. Editores: Fairbridge, R. W. y Finkl, C. W. Stroudsburg, Pennsylvania: Hutchinson & Ross Inc.,1979, p. 1 – 3.

Cattell, R. B. The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research*, 1966b, 1:2, p. 245 – 276.

Cavallaro, N. y McBridge, M. B. Activities of Cu^{2+} and Cd^{2+} in soil solutions as affected by pH. *Soil Science Society of America Journal,* 1980, 44, p. 729 – 732.

Cavallaro, N. y McBride, M. B. Zinc and copper sorption and fixation by an acid soil clay: Effects of selective dissolutions. *Soil Science Society of America Journal,* 1984, 48, p. 1050 – 1054.

Cees, S. y Win, V. *Plant nutrition of greenhouse crops*. Heidelberg, Germany: Springer, 2009.

Celette, F., Findeling, A. y Gary, C. Competition for nitrogen in an unfertilized intercropping system: The case of an association of grapevine and grass cover in a Mediterranean climate. *European Journal of Agronomy*, 2009, 30, p. 41 – 51.

Chan, K. Y., Davey, B. G. y Geering, H. R. Adsorption of magnesium and calcium by a soil with variable charge. *Soil Science Society of America Journal*. 1979, 43, p. 301 – 304.

Chaney, R. L. y Coulombe, B. A. Effect of phosphate on regulation of Fe-stress response in soybean and peanut. *Journal of Plant Nutrition*, 1982, 5, p. 469 – 487.

Chaney, R. L., Brown, J. C. y Tiffin, L. O. Obligatory reduction of ferric chelates in iron uptake by soybeans. *Plant Physiology*, 1972, 50, p. 208 – 213.

Chang, S. C. *Chemistry of paddy soils*. Taipei, Taiwan: ASPAC Food and Fertilizer Technology Center, 1971.

Chang, Y-C, Ma, J. F., Matsumoto, H. Mechanism of Al induced iron chlorosis in wheat (*Triticum aestivum*) . Al inhibited biosynthesis and secretion of phitosiderophore. *Physiologia Plantarum*, 1998, 102, p. 9 - 15.

Chapin, F.S. Effects of multiple environmental stresses on nutrient availability and use. En: *Response of plants to multiple stresses*. Editores: Mooney, H.A., Winner, W.E. y Pell, E.J. San Diego, California: Academic Press, 1991, p. 67 – 88.

Chapin, F. S. Integrated response of plants to stress. *BioScience*, 1991, 41, p. 29 – 36.

Cheng, B. T. Soil organic matter as a plant nutrient. En: *Soil Organic Matter Studies,* Vol. I. Vienna: IAEG, 1977.

Chiera, J., Thomas, J. y Rufty, T. Leaf initiation and development in soybean under phosphorus stress. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53, p. 473 – 481.

Chinnery, L. E. y Harding, C. P. The effect of ferrous iron on the uptake of manganese by *Juncus effusus*. *Annals of. Botany,* 1980, 46, p. 409 – 412.

Christensen, P. Nutrient level comparisons of leaf petioles and blades in twenty-six grape cultivars over three years (1979 through 1981). *American Journal of Enology and Viticulture*, 1984, 35, p. 124 – 133.

Christensen, N. W. y Jackson, T. L. Potential for phosphorus toxicity in zinc stressed corn and potato. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45, p. 904 – 909.

Christenson, D. R., White, R. P. y Doll, E. C. Yields and magnesium uptake by plants as affected by soil pH and Ca level. *Agronomy Journal,* 1973, 65, p. 205 – 206.

Clark, R. B. 1984. Physiological aspects of calcium, magnesium, and molybdenum deficiencies in plants. En: *Soil acidity and liming*, 2nd edition. Editor: Adams, F. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1984, p. 99 – 170.

Clark, R. B. Sorghum. En: *Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants.* Editor: Bennett, W. F. St. Paul, Minnesota: The American Phytopathological Society, American Phytopathological Society Press, 1993, p. 21 – 26.

Clarkson, D. T. Factors affecting mineral nutrient acquisition by plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 1985, 36, p. 77 – 115.

Clarkson, D. T. y Hanson, J. B. The mineral nutrition of higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 1980, 31, p. 239 – 298.

Clarkson, D. T. et al. Root hydraulic conductance: diurnal aquaporin expression and the effects of nutrient stress. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51, p. 61 – 70.

Cleveland, J. M. y Rees, T. F. Characterization of plutonium in Maxey Flats radioactive trench leachates. *Science*, 1981, 212, p. 1506 – 1509.

Cline, R.A. y Bradt, O.A. The Effect of Source and Rate of Potassium on the Performance of "Concord" Grape Vine Grown on Clay Loam Soil. *American Society of Horticultural Science*, 1980, 105:5, p. 650 - 653.

Cocucci, S. et al. A possible relationship between stalk necrosis and membrane transport in grapevine cultivars. *Scientia Horticulturae*, 1988, 34, p. 67 – 74.

Conradie, W. J. Seasonal uptake of nutrients by Chenin blanc in sand culture: I. Nitrogen. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 1980, 1, p. 59 – 65.

Conradie, W. J. Nutrient consumption by Chenin blanc grown in sand culture and seasonal changes in the chemical composition of leaf blades and petioles. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 1981a, 2, p. 15 – 18.

Conradie, W. J. Seasonal uptake of nutrients by Chenin blanc in sand culture: II. Phosphorus, potassium, calcium and magnesium. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 1981b, 2, p. 7 – 13.

Conradie, W.J. y Saayman, D. Effects of Long-Term Nitrogen, Phosphorous and Potassium Fertilization on Chenin blanc Vines. II Leaf Analysis and Grape Composition. *American Journal of Enolology and Viticulture*, 1989b, 40:2, p. 91 - 98

Conyers, M. The control of aluminium solubility in some acidic Australian Soils. *Journal of Soil Science,* 1990, 41, 147 – 156.

Cook, J. A. Grape nutrition. En: *Nutrition of Fruit Crops,* second edition. Editor: Childers, N. F. New Brunswick, New Jersey: Horticultural Publication. Rutgers, the State University, 1966.

Cook, R. D. y Weisberg, S. *Residuals and influence in regression*. New York, New York: Chapman & Hall, 1982.

Coruzzi, G. M. y Zhou, L. Carbon and nitrogen sensing and signaling in plants: emerging 'matrix effects'. *Current Opinion in Plant Biology*, 2001, 4, p. 247 – 253.

Cramer, M. D., Hoffmann, V. y Verboom, G. A. Nutrient availability moderates transpiration in Ehrharta calycina. *New Phytologist*, 2008, 179, p. 1048–1057.

Cuevas, J. C. et al. (2008). Putrescine is involved in Arabidopsis freezing tolerance and cold acclimation by regulating abscisic acid levels in response to low temperature. *Plant Physiology*, 2008, 148, p. 1094 – 1105.

Cumming, J. R y Ecbert, R. T. Effect of Al on P uptake and translocation by red spruce seedling. *The Canadian Journal of Botany*, 1986, 16, p. 864 - 867.

Curie, C. y Briat, J. F. Iron transport and signaling in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 2003, 54, p. 183– 206.

Curie, C. et al. Metal movement within the plant: contribution of nicotianamine and yellow stripe 1-like transporters. *Annals of Botany*, 2009, 103, p. 1 – 11.

Dakora, F. D. y Phillips, D. A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil*, 2002, 245, p. 35 – 47.

Dancey, C. P. y Reidy, J. *Statistics without maths for psycologhy,* fifth edition. Harlow, England: Pearson Education Limited, 2011.

Davies, W. J., Wilkinson, S. y Loveys, B. Stomatal control by chemical signalling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytologist*, 2002, 153, p. 449 – 460.

De Boer, A.H. y Wegner, L.H. 1997. Regulatory mechanisms of ion channels in xylem parenchyma cells. *Journal of Experimental Botany,* 1997, 48, p. 441 – 449.

De Datta, S. K. y Mikkelsen, D. S. Potassium nutrition of rice. En: *Potassium in agriculture*. Editor: Munson, R. D. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1985, p. 665 – 699.

De Kreij C Interactive effects of air humidity, calcium and phosphate on blossom-end rot, leaf deformation, production and nutrient contents of tomato. *Journal of Plant Nutrition*, 1996, 19, p. 361 – 377.

Delas, J. y Pouget, R. Action de la concentration de la solution nutritive sur quelques caractéristiques physiologiques et technologiques chez *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet-Sauvignon. II. Composition minérale des organes végétatifs, du moût et du vin. *Agronomie*, 1994, 4, p. 443 – 1350.

Delgado, R. et al. Changes in the phenolic composition of grape beries during ripening in relation to vineyard nitrogen and potassium fertilisation rates. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 2004, 84, p. 623 - 630.

Delhaize, E. et al. Aluminium tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). Plant Physiology, 1993, 103, p. 685 – 693.

Dibb, D. W. y Thompson, W. R. Jr. Interaction of potassium with other nutrients. En: *Potassium in agriculture.* Editor: Munson, R. D. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1985, p. 515 533.

Dibb, D. W. y Welch, L. F. Corn growth as affected by ammonium vs. nitrate absorbed from soil. *Agronomy .Journal.* 1976, 68, p. 89 – 94.

Driscoll, C.T. et al. Acidic deposition in the northeastern United States: sources and inputs, ecosystem effects and management strategies. *BioScience*, 2001, 51, p. 180 – 198.

Duffy, B. Zinc and plant disease. En: *Mineral nutrition and plant disease*. Editores: Datnoff,L. E., Elmer, W. H. y Huber, D. M. St. Paul, Minnesota: The American Phytopathological Society, 2007, p. 155 – 175.

Dugardeyn, J. y Van Der Straeten, D. Ethylene: Fine-tuning plant growth and development by stimulation and inhibition of elongation. *Plant Science*, 2008, 175, p. 59 – 70.

Dundon, C.G., Smart, R.E. y McCarthy, M.G. The Effects of Potassium Fertilizer on Must and Wine Potassium Levels of Shiraz Grapevines. *American Journal of Enolology and Viticulture*, 1984, 35 (4), p. 200 - 205.

Eastin, J. D. y Sullivan, C. Y. Environmental stress influences on plant persistence, physiology, and production. En: *Physiological basis of crop growth and development*, 1984. Editor: Tesar, M. B. Madison, Wscosin: American Society of Agronomy, 1984, p. 201 – 236.

Eichert, T. y Goldbach, H. E. Equivalent pore radii of hydrophilic foliar uptake routes in stomatous and astomatous leaf surfaces—Further evidence for a stomatal pathway. *Physiologia Plantarum*, 2008, 132, p. 491 – 502.

Eleftheriou, E. P. y Karataglis, S. Ultrastructural and morphological characteristics of cultivated wheat growing on copper polluted fields. *Botanica Acta*, 1989, 102, p. 134 – 140.

Elrashidi, M. A. y O'Connor, G. A. Influence of solution composition on sorption of zinc by soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1982a, 46, p. 1153 – 1158.

Epstein, E. Silicon. *Annual review plant physiology and plant molecular biology,* 1999, 50, p. 641 - 664.

Epstein, E. y Bloom, A. J. *Mineral nutrition of plants: Principles and Perspectives, 2nd ed.* Sunderland, Massachusetts: Sinauer, 2005.

Eraslan, F. et al. Boron toxicity alters nitrate reductase activity, proline accumulation, membrane permeability, and mineral constituents of tomato and pepper plants. *Journal of Plant Nutrition,* 2007, 30, p. 981 – 994.

Ernani, P. R., Bayer, C. y Maestri, L. Corn yield as affected by liming and tillage system on an acid Brazilian Oxisol*. Agron. J*, 2002, 94, p.305 – 309.

Evans, H. J. y Sorger, G. J. Role of mineral elements with emphasis on the univalent cations. *Annual review plant physiology,* 1966, 17, p. 47 – 76.

Evans, I., Solberg, E. y Huber, D. M. Copper and plant disease. En: *Mineral nutrition and plant disease*. Editores: Datnoff, L. E., Elmer, W. H. y Huber, D. M. St. Paul, Minnesota: The American Phytopathological Society, 2007, p. 177 – 188.

Evans, J. R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. *Oecologia*, 1989, 78, p. 9 – 19.

Expert, D. Iron and plant disease. En: *Mineral nutrition and plant disease*. Editores: Datnoff, L. E., Elmer, W. H. y Huber, D. M. St. Paul, Minnesota: The American Phytopathological Society, 2007, p. 119 – 137.

Fageria, N. K. Ionic interactions in rice plants from dilute solutions. *Plant and Soil*. 1983, 70, p. 309 – 316.

Fageria, N. K. *Fertilization and mineral nutrition of rice*. Rio de Janeiro CNPAF, Goiânia, Brazil: EMBRAPA-CNPAF, 1984.

Fageria, N. K. *Tropical soils and physiological aspects of crops*. Brasilia, Goiânia, Brazil: EMBRAPA-CNPAF, 1989.

Fageria, N. K. *Maximizing crop yields.* New York: Marcel Dekker, 1992.

Fageria, N. K. Upland rice response to soil acidity in cerrado soil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira,* 2000, 35, p. 2303 – 2307.

Fageria, N. K. Influence of micronutrients on dry matter yield and interaction with other nutrients in annual crops. *Pesquisa Agropecuária Brasileira,* 2002a, 37, p. 1765 – 1772.

Fageria, N. K. Influence of dry matter and length of roots on growth of five field crops at varying soil zinc and copper levels*. Journal of Plant Nutrition,* 2004, 27, p. 1517 – 1523.

Fageria, N. K. y Baligar, V. C. Response of common bean, upland rice, corn, wheat, and soybean to soil fertility of an Oxisol. *Journal of Plant Nutrition*. 1997, 20, p. 1279 – 1289.

Fageria, N. K. y Baligar, V. C. Fertility management of tropical acid soil for sustainable crop production. En: *Handbook of soil acidity. Editor:* Rengel, Z. New York: Marcel Dekker, 2003, p. 359 – 385.

Fageria, N. K. y Baligar, V. C. Nutrient availability. En: *Encyclopedia of soils in the Environment*. Editor: Hillel. San Diego, California: Elsevier, 2005, p. 63 – 71.

Fageria, N. K. y Baligar, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in agron*omy, 2005a, 88, p. 97 – 185.

Fageria, N. K. y Barbosa Filho, M. P. Identification and correction nutrient deficiencies in rice. *Embrapa Arroz e Feijão* Circular number 75, 2006.

Fageria, N. K. y Gheyi, H. R.. *Efficient crop production*. Campina Grande, Paraiba, Brazil: University of Paraiba, 1999.

Fageria, N. K. y Souza,C. M. R. Upland rice, common bean, and cowpea response to magnesium application on an Oxisol. *Communications in Soil Science and Plant Analisys,* 1991, 22, p. 1805 – 1816.

Fageria, N. K. y Zimmermann, F. J. P. Influence of pH on growth and nutrient uptake by crop species in an Oxisol. *Communications in Soil Science and Plant Analisys*, 1998, 29, p. 2675 – 2682.

Fageria, N. K., Baligar, V. C. y Clark, R. B. *Physiology of crop production*. New York, New York: Haworth Press, 2006.

Fageria, N. K., Baligar, V. C. y Jones, C. A. *Growth and mineral nutrition of field crops*, 2nd edition. New York: Marcel Dekker, 1997a.

Fageria, N. K., Baligar, V. C. y Clark, R. B. Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy*, 2002, 77, p. 185 – 268.

Fageria, N. K., Santos, A. B. y Baligar, V. C. Phosphorus soil test calibration for lowland rice on an Inceptisol. *Agronomy Journal,* 1997b, 89, p. 737 – 742.

Fageria, N. K., Slaton, N. A. y Baligar, V. C. Nutrient management for improving lowland rice productivity and sustainability. *Advances in Agronomy,* 2003, 80, p. 63 – 152.

Fageria, N. K., Zimmermann, F. J. P. y Baligar, V. C. Lime and phosphorus interactions on growth and nutrient uptake by upland rice, wheat, common bean, and corn in an Oxisol. *Journal of Plant Nutri*tion, 1995, 18, p. 2519 – 2532.

Farquhar, G. D. et al. On the gaseous exchange of ammonia between leaves and the environment: Determination of the ammonia compensation point. *Plant Physiology*, 1980, 66, p. 710 – 714.

Feild, T. S., Lee, D. W. y Holbrook, N. M. Why leaves turn red in autumn. The role of anthocyanins in senescing leaves of red-osier dogwood. *Plant Physiology*, 2001, 127, p. 566 – 574.

Ferguson, B. J. y Beveridge, C. A. Roles for auxin, cytokinin, and strigolactone in regulating shoot branching. *Plant Physiology*, 2009, 149, p. 1929 – 1944.

Ferguson, I. B. Calcium in plant senescence and fruit ripening. *Plant, Cell and Environment*, 1984, 7, p. 477 – 489.

Field, A. *Discovering statistics using SPSS*, third edition. SAGE Publications, 2009.

Fixen, P. Nutrient management following conservation reserve program. *Better Crops*, 1996, 80, p. 16 – 19.

Follett, R. H., Murphy, L. S. y Donahue, R. L. *Fertilizers and soil amendments*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1981.

Forde, B. G. Local and long-range signaling pathways regulating plant responses to nitrate. *Annual Review of Plant Biology*, 2002, 53, p. 203 – 224.

Foth, H. D. y Ellis, B. G. *Soil fertility.* New York: John Wiley & Sons, 1988.

Foy, C. D. Physiological effects of hydrogen, aluminum, and manganese toxicities in acid soils. En: *Soil acidity and liming*, 2nd edition. Editor: Adams, F. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1984, p. 57 – 97.

Foy, C. D., Chaney M. C. y White, R. L. The physiology of metal toxicity in plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 1978, 29, p. 511 - 566.

Francis, D. D., Schepers, J. S. y Sims, A. L. Ammonia exchange from corn foliage during reproductive growth. *Agronomy Journal,* 1997, 89, p. 941 – 946.

Franceschi, V. R. y Nakata, P. A. Calcium oxalate in plants: formation and function. *Annual Review of Plant Biology*, 2005, 56, p. 41 – 71.

Fredeen, A. L. et al. Effects of phosphorus nutrition on photosynthesis in *Glyne max* L. Merr. *Planta*, 1990, 181, p. 399 – 405.

Fregoni, M. Exigences d'éléments nutritifs en viticulture. *Boletín O.I.V.,* 1985, 58, p. 416–434.

Fregoni M *Viticoltura di qualità*. Milano: Tecniche Nuove, 2005.

Freney, J. R. y Boonjawat, J. Sulfur transformation in wetland soils. En: *Sulfur in Southeast Asian & South Pacific agriculture*. Editores: Blair, G. J. y Till, A. R. Armidale, N. S. W., Australia: University of New England, 1983.

Friesen, D. K., Juo, A. S. R. y Miller, M. H. Liming and lime-phosphate-zinc interactions on two Nigerian Ultisols. I. Interactions in the soil. *Soil Science Society of America Journal,* 1980, 44, p. 1221 – 1226.

Gamble, D. S. Interactions between natural organic polymers and metals in soil and fresh water systems: equilibria. En: *The importance of Chemical Speciation in Environmental Processes.* Editores: Bernhard, M., Brinckman, F. E. y Sadler, P. J. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1986.

Gambrell, R. P., y Patrick Jr., W. H. Manganese. En: *Methods of soil analysis*, Part 2, 2nd edition. Editor: Page, A. L. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1982, p. 313 – 322.

García, A. *Mapa de suelos de Castilla y León*. Servicio de Ordenación del Territorio y Cartografía. Junta de Castilla y León, 1987.

García, M. et al. Effects of Various Potassium-Calcium Ratios on Cation Nutrition of Grape Grown Hydroponically. *Journal of Plant Nutrition*, 1999, 22:3, p. 417 - 425.

García, M. et al. Effects of Three Rootstocks on Grape (*Vitis vinifera* L.) cv. Négrette, Grown Hydroponically. I. Potassium, Calcium and Magnesium Nutrition. *South African Journal of Enolology and Viticulture*, 2001, 22:2, p. 101 – 103.

Gärtel, W. Grapes. En: *Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants*. Editor: Bennett, W. F. St. Paul, Minnesota: The American Phytopathological Society, 1993, p. 177 – 183.

Garzón, E. et al. Mineralization and Nutrient Release of an Organic Fertilizer Made by Flour, Meat, and Crop Residues in Two Vineyard Soils with Different pH Levels. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42:13, p. 1485 – 1496.

Gastal, F. y Lemaire, G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53, p. 789 – 799.

Geering, H. R. y Hodgson, J. F. Micronutrient cation complexes in soil solution III. Characterization of soil solution ligands and their complexes with Zn^{2+} and Cu^{2+}. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1969, 33, p. 54 – 59.

Geny, L. et al. Free, conjugated, and wall-bound polyamines in various organs of fruiting cuttings of *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon. *American Journal of Enology and Viticulture*, 1997a, 48, p. 80 – 84.

Geny, L. et al. Effects of potassium nutrition on polyamine content of various organs of fruiting cuttings of *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon. *American Journal of Enology and Viticulture*,1997b, 48, p. 85 – 92.

Giordano, P. M., Noggle, J. C. y Mortvedt, J. J. Zinc uptake by rice as affected by metabolic inhibitors and competing cations. *Plant Soil,* 1987, 41, p. 637 – 646.

Gluhic, D. et al. The content of Mg, K and Ca ions in vine leaf under foliar applications of magnesium on calcareous soils. *Agriculturae Conspectus Scientificus,* 2008, 74:2, 81 – 84.

Goldberg, S. Chemistry and mineralogy of boron in soils. En: *Boron and its role in crop Production.* Editor: Gupta, U. C. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1993, p. 3 – 44.

Gotoh, S. y Patrick, W. H., Jr. Transformation of iron in a waterlogged soil as influenced by redox potential and pH. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1974, 38, p. 66 – 71.
Graham, J. M., Guthrie, A. C. y Thompson, B. Consequences of not interpreting structure coefficients in published CFA research: A reminder. *Structural Equation Modeling,* 2003, 10:1, p. 142 – 153.

Graham, R. D. et al. Effect of zinc deficiency on the accumulation of boron and other mineral nutrients in barley. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51, p. 652 – 657.

Grant, R. S. y Matthews, M. A. The influence of phosphorus availability, scion, and rootstock on grapevine shoot growth, leaf area, and petiole phosphorus concentration. *American Journal of Enology and Viticulture*, 1996, 47, p. 217 – 224.

Gressel, N. y McColl, J.G. 1997. Phosphorus mineralization and organic matter decomposition: A critical review. En: *Driven by nature: plant litter quality and decomposition*. Editores: Cadisch, G. y Giller, K.E. Wallingford: CAB International, 1997.

Grewal, H. S. y Graham, R. D. Residual effects of subsoil zinc and oilseed rape genotype on the grain yield and distribution of zinc in wheat. *Plant Soil,* 1999, 207, p. 29 – 36.

Griffin, G. P. y Jurinak, J. J. Estimation of activity coefficients from the electrical conductivity of natural aquatic systems and soil extracts. *Soil Science,* 1973, 116, p. 26 – 30.

Grossman, A. y Takahashi, H. Macronutrient utilization by photosynthetic eukaryotes and the fabric of interactions. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 2001, 52, p. 163 – 210.

Grunes, A., Alpaslan, M. y Inal, A. Critical nutrient concentrations and antagonistic and synergistic relationships among the nutrients of NFT-grown young tomato plants*. Journal of Plant Nutrition,* 1998, 21, p. 2035 – 2047.

Gunes, A. y Alpaslan, M. 2000. Boron uptake and toxicity in maize genotypes in relation to boron and phosphorus supply. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 21, p. 541 – 550.

Gupta, U. C. A simplified method for determining hot-water soluble boron in podzol soil. *Soil Science,*1967,103, p. 424 – 428.

Gupta, U. C. 1979. Boron nutrition of crops. *Advances in Agronomy,* 1979, 31, p. 273 – 307.

Gupta, U. C. Factors affecting boron uptake by plants. En: *Boron and its role in crop production*. Editor: Gupta, U. C. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1993, p. 87 – 123.

Haeseler, C.W. et al. Response of Mature Vines of *Vitis Labrusca* L. cv Concord to Application of Phosphorous and Potassium Over an Eight-Year Span in Pennsylvania. *American Journal of Enolology and Viticulture*, 1980, 31:3, p. 237 - 244.

Hale, M. G., Foy, C. D. y Shay, F. J. Factors affecting root exudation. *Advances in Agronomy,* 1971, 23, p. 89 – 109.

Hall, J. L. y Williams, L. E. Assimilate transport and partitioning in fungal biotrophic interactions. *Australian Journal of Plant Physiology*, 2000, 27, p. 549–560.

Halsted, M. y Lynch, J. 1996. Phosphorus responses of C3 and C4 species. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47, p. 497 – 505.

Hammond, J. P. y White, P. J. Sucrose transport in the phloem: integrating root responses to phosphorus starvation. *Journal of Experimental Botany*, 2008, 59, p. 93 – 109.

Haneklaus, S., Bloem, E. y Schnug, E. Sulfur and plant disease. En: *Mineral nutrition and plant disease*. Editores: Datnoff, L. E., Elmer, W. H. y Huber, D. M. St. Paul, Minnesota: The American Phytopathological Society, 2007, p. 101 – 118.

Hannaway, D. B., Bush, L. P. y Leggett, J. E. Mineral composition of Kenhytall fescue as affected by nutrient solution concentrations of Mg and K. *Journal of Plant Nutrition*, 1982, 5, p. 137 – 151.

Hanson, J. B. The functions of calcium in plant nutrition. En: *Advances in plant nutrition*. Editores: Tinker, P. K. y Lauchli, E. New York: Praeger, 1984, p. 149 – 208.

Harper, L. A. y Sharpe, R. R. Nitrogen dynamics in irrigated corn: Soil-plant nitrogen and atmospheric ammonia transport. *Agronomy Journal*, 1995, 87, p. 669 – 675.

Havlin, J. L., Westfall, D. G. y Olsen, S. R. Mathematical models for potassium release kinetics in calcareous soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49, p. 371 – 376.

Heber, U. y Heldt, H. W. The chloroplast envelope. *Annual Review of Plant Physiology*, 1981, 33, p. 73 – 96.

Hechtbuchholz, C. y Foy, C. D. Effect of aluminium toxicity on root morphology of barley. *Plant soil,* 1981, 63, p. 93 – 95.

Hermans, C. et al. How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? *Trends in Plant Science*, 2006, 11, p. 610 – 617.

Hetherington, A. M. y Brownlee, C. The generation of Ca^{2+} signals in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55, p. 401 – 427.

Hill, W. E. y Morrill, L. G. Boron, calcium and potassium interactions in Spanish peanuts. *Soil Science Society of America Journal.* 1975*,* 39, p. 80 – 83.

Hinton, P. R. *Statistics explained,* second edition. New York, New York: Routledge, 2004.

Hirschi, K. D. The calcium conundrum. Both versatile nutrient and specific signal. *Plant Physiology*, 2004, 136, p. 2438 – 2442.

Hitsuda, K., Yamada, M. y Klepker, D. Sulfur requirement of eight crops at early stages of growth. *Agronomy Journal,* 2005, 97, p. 155 – 159.

Hoch, W. A., Singsaas, E. L. y McCown, B. H. Resorption protection. Anthocyanins facilitate nutrient recovery in autumn by shielding leaves from potentially damaging light levels. *Plant Physiology*, 2003, 133, p. 1296 – 1305.

Horst, W. J. The physiology of manganese toxicity. En: *Manganese in soils and plants*. Editores: Graham, R. D., Hannam, R. J. y Uren, N. C. Dordrecht: The Kluwer Academic Publishers, 1988, p. 175 – 188.

Howeler, R.H. y Cadavid, L.F. Screening of rice cultivars for tolerance of Al toxicity in nutrient solution as compared with a field screening method *Agronomy Journal*, 1976, 68: p. 551 - 555.

Hu, H. y Brown, P. H. Localization of boron in cell walls of squash and tobacco and its association with pectin: Evidence for a structural role of boron in the cell wall. *Plant Physiology,* 1994, 105, p. 681 – 689.

Huang, J. W., Grunes, D. L. y Welch, R. M. Magnesium, nitrogen form, and root temperature effects on grass tetany potential of wheat forage. *Soil Science Society of America Journal,* 1990, 82, p. 581 – 587.

Huang, J. W. et al. Aluminium effects on calcium fluxes at the root apex of aluminium tolerant and aluminium sensitive wheat cultivars. *Plant Physiology*, 1992, 98, p. 230 - 237.

Huber, D. M. y Arny, D. C. Interactions of potassium with plant diseases. En: *Potassium in agriculture*. Editor: Munson, R. D. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1985, p. 467 – 488.

Huber, D. M. y Thompson, I. A. Nitrogen and plant disease. En: *Mineral nutrition and plant disease*. Editores: Datnoff, L. E., Elmer, W. H. y Huber, D. M. St. Paul, Minnesota: The American Phytopathological Society, 2007, p. 31 – 44.
Imsande, J. Iron, sulfur, and chlorophyll deficiencies: A need for an integrative approach in plant physiology. *Plant Physiology*, 1998, 103, p. 139 – 144.

Inal, A. y Tarakcioglu, C. Effects of nitrogen form on growth, nitrate accumulation, membrane permeability and nitrogen use efficiency of hydroponically grown bunch onion under boron deficiency and toxicity. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, 24, p. 1521 – 1534.

Iyengar, S. S., Martens, D. C. y Miller, W. P. Distribution and plant availability of soil zinc fractions. *Soil Science Society of America Journal,* 1981, 45, p. 735 – 739.

Jackson, D. I. y Coombe, B. G. Early bunchstem necrosis in grapes—A cause of poor fruit set. *Vitis*, 1988, 27, p. 57 – 61.

Jackson, L. E., Burger, M., y Cavagnaro, T. R. Roots, nitrogen transformations, and ecosystem services. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59, p. 341 – 363.

Jackson, R. S. *Wine Science. Principles and Applications*, third edition. San Diego, California: Academic Press, 2008.

Jackson, T. L., Westerman, D. T. y Moore, D. P. The effect of chloride and lime on the manganese uptake by bush beans and sweet corn. *Soil Science Society American Proceedings,* 1966, 30, p. 70 – 73.

James, R. O. y Healy, T. W. Adsorption of hydrolyzable metal ions at the oxide-water interface. I. Co (II) adsorption on SiO_2 and TiO_2 as model systems. *Journal Colloid Interface Sci*ence, 1972, 40, p. 42 – 52.

Jansson, S. L. y Persson, J. Mineralization and immobilization of soil nitrogen.En: *Nitrogen in agricultural soils*. Editor: Stevenson, F. J. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1982, p. 229 - 252.

Jarvis, M. C. Structure and properties of pectin gels in plant cell walls. *Plant, Cell and Environment*, 1984, 7, p. 153 – 164.

Jayachandran, K., Schwab, A. P.y Hetrick, B. A. D. Micorrhizal mediation of phosphorus availability: Synthetic iron chelates effects on phosphorus solubilization. *Soil Science Society of America Journal,* 1989, 53, p. 1701 – 1706.

Jenny, H. *The soil resources. Origin and behavior*. New York: Springer-Verlag, 1980.

Jiménez, S. et al. Nitrogen nutrition influences some biochemical responses to iron deficiency in tolerant and sensitive genotypes of *Vitis*. *Plant and Soil*, 2007, 290, p. 343 – 355.

Johansson, I. et al. The role of aquaporins in cellular and whole plant water balance. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2000, 1465, p. 324 – 342.

Johnson, C., Edwards, D. G. y Loneragan, J. F. Interactions between potassium and calcium in their absorption by intact barley plants. I. Effects of potassium on calcium absorption. *Plant Physiology,* 1968, 43, p. 1717 – 1721.

Johnson, A.H., Frizano, J., y Vann, D.R. Biogeochemical implications of labile phosphorus in forest soils determined by the Hedley fractionation procedure. *Oecologia*, 2003, 135, p. 487 – 499.

Johnson, M. N., Reynolds, R. C. y Likens, G. E. Atmospheric sulfur: Its effect on the chemical weathering of New England. *Science,* 1972, 177, p. 514 – 515.

Jolliffe, I. T. *Pincipal component analysis*. New York, New York: Springer, 1986.

Jones, J. B. *A Practical Guide for the soiless grower.* Boca Raton, Florida: St. Lucie Press, 2000.

Jones, J. B. y Huber, D. M. Magnesium and plant disease. En: *Mineral nutrition and plant disease*. Editores: Datnoff, L. E., Elmer, W. H. y Huber D. M. St. Paul, Minnesota: The American Phytopathological Society, 2007, p. 95 – 100.

Juárez, M. y Sánchez, J. *Fósforo en agricultura*. Alicante, España: Universidad de Alicante, 1996.

Kaiser, B. N. et al. The role of molybdenum in agricultural plant production. *Annals of Botany*, 2005, 96, p. 745 – 754.

Kaiser, H. F. The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement,* 1960, 20, p. 141 – 151.

Kaiser, H. F. A second generation little jiffy. *Psychometrika,* 1970, 35, p. 401 – 415.

Kakimoto, T. Perception and signal transduction of cytokinins. *Annual Review of Plant Biology*, 2003, 54, p. 605 – 627.

Kang, B. T. et al. Sulfur status of some Nigerian soils from the savanna and forest zones. *Soil Science,* 1981, 132, p. 220 – 227.

Kariuki, S. K. et al. Hard red winter wheat cultivar responses to a pH and aluminum concentration gradient. *Agronomy Journal*, 2007, 99, p.88 – 98.

Keller, M., & Koblet, W. Dry matter and leaf area partitioning, bud fertility and second-season growth of *Vitis vinifera* L.: Responses to nitrogen supply and limiting irradiance. *Vitis*, 1995a, 34, p. 77 – 83.

Keller, M. y Koblet, W. Stress-induced development of inflorescence necrosis and bunch stem necrosis in Vitis vinifera L. in response to environmental and nutritional effects. *Vitis*, 1995b, 34, p. 145 – 150.

Keller, M., Kummer, M. y Vasconcelos, M. C. Reproductive growth of grapevines in response to nitrogen supply and rootstock. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2001a, 7, p. 12 – 18.

Keller, M., Kummer, M. y Vasconcelos, M. C. Soil nitrogen utilisation for growth and gas exchange by grapevines in response to nitrogen supply and rootstock. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2001b, 7, p. 2 – 11.

Keller, M. et al. Carbon and nitrogen partitioning in *Vitis vinifera* L.: Responses to nitrogen supply and limiting irradiance. *Vitis*, 1995, 34, p. 19 – 26.

Keren, R. y Mezuman, U. Boron adsorption by clay minerals using a phenomenological equation. *Clays and Clay Minerals*, 1981, 29, p. 198 – 204.

Keren, R. y Bingham, F. T. Boron in water, soils, and plants. *Advances in Soil Science*, 1985, 1, p. 229 – 276.

Keren, R., Gast, R. G. y Bar-Yosef, B. pH-dependent boron adsorption by Na-montmorillonite. *Soil Science Society of America Journal,* 1981, 45, p. 45 – 48.

Khattak, R. A., Jarrell, W. M. y Page, A. L. Mechanism of native manganese release in salt treated soils. *Soil Science Society American Journal,* 1989, 53, p. 701 – 705.

Klein, C. y Hurlbut Jr., C. S. *Manual of mineralogy*, 20th edition. New York: John Wiley & Sons, 1985.

Klein I. et al. Irrigation and fertigation on phosphorus and potassium nutrition of wine grapes. *Vitis*, 2000, 39, p. 55 – 62.

Klikocka, H. et al. Influence of sulfur fertilization on infection of potato tubers with *Rhizoctonia solani* and *Streptomyces scabies*. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, 28, p. 819 – 833.

Klug, A. y Rhodes, D. Zinc fingers a novel protein motif for nucleic acid recognition. *Trends in Biochemical Sciences*, 1987, 12, p. 464 – 469.

Kmenta, J. *Elements of econometrics,* second edition. Ann Arbor, Michigan: University of Michigan Press, 1997.

Koch, K. Sucrose metabolism: regulatory mechanisms and pivotal roles in sugar sensing and plant development. *Current Opinion in Plant Biology*, 2004, 7, p. 235 – 246.

Kochain, L. V. Mechanisms of micronutrient uptake and translocation in plants. En: *Micronutrient in agriculture*. Editores: Mortvedt, J. J. et al. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1991, p. 229 – 296.

Kochain, L. V., Hoekenga, O. A. y Piñeros, M. A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55, p. 459 – 493.

Krauskopf, B. Geochemistry of micronutrients. In: *Micronutrients in agriculture*. Editor: Mortvedt, J. J. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1972, p. 7 – 40.

Krishnamurti, G. S. R. y Huang, P. M. Dynamics of potassium chloride induced manganese release in different soil orders. *Soil Sci. Society American Journal,* 1992, 56, p. 1115 – 1123.

Kuo, S. Effects of organic residues and nitrogen transformations on phosphorus sorption desorption by soil. *Agronomy abstracts*. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, 1983.

Kusano, T. et al. Polyamines: essential factors for growth and survival. *Planta*, 2008, 228, p. 367 – 381.

Lalonde, S., Wipf, D. y Frommer, W. B. Transport mechanisms for organic forms of carbon and nitrogen between source and sink. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55, p. 341 – 372.

Lambers, H et al. N and P acquisition change as soils age. *Trends in Ecology & Evolution,* 2008, 23, p. 95 – 103.

Lance, R. y Pearson, J. C. Effects of low concentration of Al on growth and water and mineral uptake by cottons roots. Soil Science Society American Proceedings, 1969, 33, p. 95 - 98.

Lee, J. y Pritchard, M. V. Aluminium toxicity expresion on nutrient uptake, growth and root morfology of *Trifolium repens* L. *Plant Soil,* 1984, 82:1, p. 101 - 116.

Lemaire, G. y Millard, P. An ecophysiological approach to modelling resource fluxes in competing plants. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 50, p. 15 – 28.

Lexmond, T. M. y van der Vorm, P. D. J. The effect of pH on copper toxicity to hydroponically grown maize. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1981, 29, p. 217 – 238.

Lillo, C., Lea, U. S. y Ruoff, P. Nutrient depletion as a key factor for manipulating gene expression and product formation in different branches of the flavonoid pathway. *Plant, Cell and Environment*, 2008, 31, p. 587 – 601.

Lin, C., Busscher, W. J. y Douglas, L. A. Multifactor Kinetics of phosphate reactions with minerals in acidic soils. I. Modeling and simulation. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47, p. 1097 – 1103.

Lin, C. y Coleman, M.T. The measurement of exchangeable aluminum in soils. *Soil Science Society American Proceedings*, 1960, 24, p. 444 - 446.

Lindsay, W. L. y Norvell, W. A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society American Journal*, 1978, 42, p. 421 - 428.

Lindsay, W. L. *Chemical equilibrium in soils.* New York: John Wiley & Sons, 1979.
Lindsay, W. L. y Schwab, A. P. The chemistry of iron in soils and its availability to plants. *Journal of Plant Nutrition,* 1982, 5, p. 321 – 340.

Little, I. The determination of exchangeable aluminum in soils. *Australian Journal of Soil Research*, 1964, 2, p. 76 - 82.

Liu, K. y Luan, S. Internal aluminium block of plant inward potassium channels. *Plant Cell,* 2001, 13, p. 1453 - 1466.

Llugany, M., Poschenrieder, Ch. y Barceló, J. Monitoring of aluminium induced inhibition in root elongation in four maize cultivars differing in tolerance to aluminium and proton toxicity. *Plant Physiology*, 1995, 93, p. 265 - 271.

Loeppert, R. H. y Hallmark, C. T. Indigenous soil properties influencing the availability of iron in calcareous soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49, p. 597 – 603.

Loneragan, J. F. et al. Phosphorus toxicity as a factor in zinc-phosphorus interactions in plants. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, 43, p. 966 – 972.

Loneragan, J. F. et al. Phosphorus accumulation and toxicity in relation to zinc supply. *Soil Science Society of America Journal,* 1982, 46, p. 345 – 352.

López-Bucio, J., Cruz-Ramírez, A. y Herrera-Estrella, L. The role of nutrient availability in regulating root architecture. *Current Opinion in Plant Biology*, 2003, 6, p. 280 – 287.

López, E. Tratamiento de la colinealidad en la regresión múltiple. *Psicothema,* 1998, Vol. 10 (2), p. 491 – 507.

López-Lefebre, L. R. et al. Boron effect on mineral nutrients of tobacco. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25, p. 509 – 522.

Lynch, J., Lauchli, A. y Epstein, E. Vegetative growth of the common bean in response to phosphorus nutrition. *Crop Science*, 1991, 31, p. 380 – 387.

Ma, J. F. et al. Detoxifying aluminium with buckwheat. *Nature,* 1997a, 390, p. 569 – 570.

Ma, Q., Rengel, Z. y Kuo, J. Aluminum toxicity in Rye (*Secale cereale*): Root growth and dynamics of cytoplasmic calcium in intact root tips. *Annals of Botany*, 2002, 89, p. 241 – 244..

Maas, E. V. y Ogata, G. Absorption of magnesium and chloride by excised corn roots. *Plant Physiology*, 1971, 47, p. 357 – 360.

Maas, E. V., Moore, D. P. y Mason, B. J. Influence of calcium and manganese on manganese absorption. *Plant Physiology*, 1968, 44, p. 796 – 800.

Malamy, J. E. Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture. *Plant, Cell and Environment*, 2005, 28, p. 67 – 77.

Malkanthi, D. R. R., Moritsugu, M. y Yokoyama, K. Effects of low pH and Al on absoption and translocation of some essential nutrients in excised barley roots. *Soil Science & Plant Nutrition*, 1995, 41:2, p. 253 - 262.

Mandal, B., Hazra, G. C. y Mandal, L. N. Soil management influence on zinc desorption for rice and maize nutrition. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64, p. 1699 – 1705.

Marschner, H. *Mineral nutrition of higher plants,* 2nd ed. London: Academic Press, 1995.

Marschner, H. y Cakmak, I. High light intensity enhances chlorosis and necrosis in leaves of zinc, potassium, and magnesium deficient bean (*Phaseolus vulgaris*) plants. *Journal of Plant Physiology,* 1989, 134, p. 308 – 315.
Marschner, H., Romheld, V., y Kissel, M. Different strategies in higher plants in mobilization and uptake of iron. *Journal of Plant Nutrition*, 1986, 9, p. 695 – 713.

Marten, I., et al. AKT3, a phloem-localized K^+ channel, is blocked by protons. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 1999, 96, p. 7581 – 7586.

Massot, N. et al. Callosa production as indicator of aluminium toxicity in bean cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, 1999, 22:1, p. 1 -10.

Matocha, J. E. y Thomas, G. W. Potassium and organic nitrogen content of grain sorghum as affected by iron. *Agronomy Journal.* 1969, 61, p. 425 – 428.

Matsumoto, H. et al. Response of the plant root to aluminium stress: Analisys of the inhibition of the root elongation and changes in membrane function. *Journal of Plant Research*, 1999, 109, p. 99 - 105.

Maurel, C. et al. Plant aquaporins: membrane channels with multiple integrated functions. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59, p. 595 – 624.

May, P. *Flowering and Fruitset in Grapevines*. Adelaide, South Australia: Lythrum Press, 2004.

McAinsh, M. R., & Pittman, J. K. Shaping the calcium signature. *New Phytologist*, 2009, 181, p. 275 – 294.

McBride, M. B. Cupric ion activity in peat soil as a toxicity indicator for maize. *Journal of Environmental Quality,* 2001, 30, 78 – 84.

McDaniel, P. A., y Buol, S. W. 1991. Manganese distribution in acid soils of the North Carolina Piedmont. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55, p. 152 – 158.

McDaniel, P. A. et al. 1992. Secondary manganese/iron ratios as pedochemical indicators of field scale through flow water movement. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56, p. 1211 – 1217.

McKenzie, R. M. Manganese oxides and hydroxides. En: *Minerals in soil environments*, 2nd edition. Editores: Dixon J. B. y Weed, S. B. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1989, p. 439 – 465.

Mengel, K. y Kirkby, E. A. *Principles of plant nutrition.* Worblaufen-Bern, Switzerland: International Potash Institute, 1987.

Mengel, K. y Malissiovas, N. (1982). Light dependent proton excretion by roots of entire vine plants (*Vitis vinifera* L.). *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 1982, 145, p. 261 – 267.

Mengel, K. et al. *Principles of plant nutrition,* 5th edition. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academics, 2001.

Menzies, N.W., Bell, L.C. y Edwards, D.G. Exchange and solution phase chemistry of acid, highly weathered soils: II. Investigation of mechanisms controlling Al release into solution. *Aust. J. Soil Res,* 1994, 32, p. 269 – 283.

Meyer et al. Pixe analysis for the study of toxic effects of aluminium in vines. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B3.* North-Holland, Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., 1984, p. 557 – 560.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. *Métodos oficiales de análisis. Tomo III.* Madrid: Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1993.

Mocquot, B. et al. Copper toxicity in young maize (*Zea mays L.*) plants: effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and enzyme activities. *Plant Soil*, 1996, 182, p. 287 – 300.

Moore, D. P., Overstreet, R. y Jacobson, L. Uptake of magnesium and its interaction with calcium in excised barley roots. *Plant Physiology*, 1961, 36, p. 290 – 295.
Montgomery, D. C. y Peck, E. A. *Introduction to linear regression analysis*. New York, New York: John Wiley, 1982.

Moraghan, J. T. y Mascagni, H. J. Jr. Environmental and soil factors affecting micronutrient deficiencies and toxicities. En: *Micronutrient in agriculture*, 2nd edition. Editores: Mortvedt, J. J. Cox, F. R., Shuman, L. M. y Welch, R. M. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America Journal, 1991, p. 371 – 425.

Mori, S. Iron acquisition by plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 1999, 2, p. 250 – 253.

Morris, J.B. y Cawthon, D.L. Effects of Irrigation, Fruit Load, and Potassium Fertilization on Yield, Quality, and Petiole Analysis of Concord (*Vitis labrusca* L.) Grapes. *American Journal of Enolology and Viticulture*, 1982, 33:3, p 145 - 148.

Morris, J. R., Cawthon, D. L. y Fleming, J. W. Effects of high rates of potassium fertilization on raw product quality and changes in pH and acidity during storage of Concord grape juice. *American Journal of Enology and Viticulture*, 1980, 31, p. 323 – 328.

Mossor-Pietraszewska, T. Effect of aluminium on plant growth and metabolism *Acta Biochimica Polonica,* 2001, 48:3, p. 673 – 686.

Muchow, R. C. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize andsorghum in semi-arid tropical environment: I. Leaf growth and leaf nitrogen. *Field Crops Research*, 1988, 18, p. 1 – 16.

Mullins, M. G., Bouquet, A. y Williams, L. E. *Biology of the Grapevine*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1992.

Murphy, J. y Riley, H. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta,* 1962, 27, p. 31 – 36.

Mpelasoka, B. S. et al. A review of potassium nutrition in grapevines with special emphasis on berry accumulation. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2003, 9, p. 154 – 168.

Navarro, S. y Navarro, G. Química agrícola, segunda edición. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa, 2003.

Neptune, A. M. L., Tabatabai, M. A. y Hanway, J. J. Sulfur fractions and carbon-nitrogen-phosphorus-sulfur relationships in some Brazilian and Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal,* 1975, 39, p. 51 – 55.

Nibau, C., Gibbs, D. J. y Coates, J. C. Branching out in new directions: the control of root architecture by lateral root formation. *New Phytologist*, 2008, 179, p. 595 – 614.

Nikolic, M., Römheld, V. y Merkt, N. Effect of bicarbonate on uptake and translocation of ^{59}Fe in two grapevine rootstocks differing in their resistance to Fe deficiency chlorosis. *Vitis*, 2000, 39, p. 145 – 149.

Nommik, H. y Vahtras, K. Retention and fixation of ammonium and ammonia in soils. En: *Nitrogen in agricultural soils*. Editor: Stevenson, F. J. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1982, p. 123 – 171.

Nor, Y. Sulfur mineralization and adsorption in soils. *Plant Soil,* 1981, 60, p. 451 – 459.

Nord, E. A. y Lynch, J. P. Plant phenology: a critical controller of soil resource acquisition. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60, p. 1927 – 1937.

Novais, R. F. et al. Manganese deficiency in soybean plants cultivated in cerrado soils. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo,* 1989, 13, p. 199 – 204.

Ohno, T. y Grunes, D. L. Potassium magnesium interactions affecting nutrient uptake by wheat forage. *Soil Science Society of America Journal,* 1985, 49, p. 685 – 690.

Olego, M. A. et al. Terroir: filosofía o realidad. *Enólogos,* 2009, 59, p. 28 – 35.

Ologunde, O. O. y Sorensen, R. C. Influence of K and Mg in nutrient solutions on sorghum. *Agronomy Journal,* 1982, 74, p. 41 – 46.

Olomu, M. O., Racz, C. J. y Cho, C. M. Effect of flooding on the Eh, pH and concentrations of Fe and Mn in several Manitoba soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1973, 37, p. 220 – 224.

Olsen, S. R. Micronutrients interactions. In: *Micronutrients in agriculture.* Editor: Mortvedt,J. J. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1972, p. 243 – 264.

Olson, R. A., y Kurtz, L. T. Crop nitrogen requirements, utilization, and fertilization. En ''*Nitrogen in Agricultural Soils*''. Editor: Stevenson, F. J. Madison, Wiscosin: American Society for Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 1982, 22, p. 567 – 604.

O'Neill, M. A. et al. Rhamnogalacturonan II: Structure and function of a borate cross-linked cell wall pectic polysaccharide. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55, p. 109 – 139.

Osaki, M. et al. Nutritional characteristics in leaves of native plants grown in acid sulphate, Peat, Sundy Podzolic and saline soils distributed in Peninsular Thailand. *Plant Soil*, 1998, 201:2, p. 175 - 182.

Osmont, K. S., Sibout, R. y Hardtke, C. S. Hidden branches: developments in root system architecture. *Annual Review of Plant Biology*, 2007, 58, p. 93 – 113.

Otsuka, K. Studies on aluminium-induced ion chlorosis. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1969, 40, p. 205 - 212.

Ouzounidou, G. et al. Response of maize plants to copper stress. I. Growth, mineral content and ultrastructure of roots. *Environmental and Experimental Botany*, 1995, 35, p. 167 – 176.

Parkin, T. B. y Meisinger, J. J. Denitrification below the crop rooting zone as influenced by surface tillage. *Journal of Environmental Quality,* 1989, 18, p. 12 – 16.

Patrick, W. H., Jr. y Mahapatra, I. C. Transformation and availability of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. *Advances in Agronomy*, 1968, 20, p. 323 – 359.

Paul, M. J. y Foyer, C. H. Sink regulation of photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52, p. 1383 – 1400.

Pearson R. C. y Goheen A. C. *Plagas y enfermedades de la vid*. Madrid: Mundi-Prensa, 2001.

Pedhazur, E. y Schmelkin, L. *Measurement, design and analysis: an integrated approach*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1991.

Pedraza, L. A. y Lora, S. R. Availability of sulfur for plants in two soils of the eastern plains of Colombia. *Revista ICA,* 1974, 9, p. 77 – 112.

Petrie, S. G. y Jackson, T. L. Effect of fertilization on soil pH and manganese concentration. *Soil Science Society American Journal,* 1984, 48, p. 315 – 348.

Pittman, J. K. Managing the manganese: molecular mechanisms of manganese transport and homeostasis. *New Phytologist*, 2005, 167, p. 733 – 742.

Plieth, C. Calcium: just another regulator in the machinery of life? *Annals of Botany*, 2005, 96, p. 1 – 8.

Poni, S., Quartieri, M. y Tagliavini, M. Potassium nutrition of Cabernet Sauvignon grapevines (*Vitis vinifera* L.) as affected by shoot trimming. *Plant and Soil*, 2003, 253, p. 341 - 351.

Ponnamperuma, F. N. The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy*, 1972, 24, p. 29 – 96.
Ponnamperuma, F. N. Physiochemical properties of submerged soils in relation to fertility. Los Banos, Philippines: International Rice Research Institute, 1977. Paper series Nº 8.

Ponnamperuma, F. N. 1985. Chemical kinetics of wetland rice soils relative to soil fertility. En: *Wetland soils: Characterization, classification, and utilization.* Los Banos, Philippines: International Rice Research Institute, 1985, p. 71 – 89.

Poorter, H. y Evans, J. R. Photosynthetic nitrogen-use efficiency of species that differ inherently in specific leaf area. *Oecologia*, 1998, 116, p. 26 – 37.

Possingham, J. V. y Groot Obbink, J. Endotrophic mycorrhiza and the nutrition of grape vines. *Vitis*, 1971, 10, p. 120 – 130.

Potters, G. et al. Different stresses, similar morphogenic responses: integrating a plethora of pathways. *Plant, Cell and Environment*, 2009, 32, p. 158 – 169.

Prenzel, J. Mass flow to the root system and mineral uptake of a beech stand calculated from three years field data. *Plant and Soil*, 1979, 51, p. 39 – 49.

Qui, J. y Israel, D. W. 1992. Diurnal starch accumulation and utilization in phosphorus deficient soybean plants. *Plant Physiology*, 1992, 98, p. 316 – 323.

Rabe, E. Stress physiology: The functional significance of the accumulation of nitrogen-containing compounds. *Journal of Horticultural Science*, 1990, 65, p. 231 – 243.

Raghothama, K. G. Phosphate acquisition. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1999, 50, p. 665 – 693.

Reddy, A. S. N. y Reddy, V. S. Calcium as a messenger in stress signal transduction. En: *Handbook of plant and crop physiology*, 2nd edition. Editor: Pessarkli, M. New York: Marcel Dekker, 2002, p. 697 – 733.

Rehm, G. W. y Caldwell, A. C. Sulfur supplying capacity of soils and the relationship to soil type. *Soil Science,* 1968, 105, p. 355 – 361.

Reid, R. J. Mechanisms of micronutrient uptake in plants. *Australian Journal of Plant Physiology*, 2001, 28, p. 659 – 666.

Reisenauer, H. M. The effect of sulfur on the absorption and utilization of molybdenum by peas. *Soil Science Society of America Journal*, 1963, 27, p. 553 – 555.

Rengel, Z. *Handbook of plant growth. pH as the master variable*. Editor: Rengel, Z. New York, New York: Marcel Dekker, 2002.

Rengel, Z. Role of calcium in aluminium toxicity. *New Phytologist*, 1992, 121, p. 491 - 513.

Ritchie, G.S.P. *Soil Acidity and Plant Growth*. Marrickville, Australia: Academic Press Australia, 1989, p. 1 – 60.

Roberts, S.K. Plasma membrane anion channels in higher plants and their putative functions in roots. *New Phytologist*, 2006, 169, p. 647 – 666.

Robinson, D. The response of plants to non-uniform supplies of nutrients. *New Phytologist*, 1994, 127, p. 635 – 674.

Robson, A. D., y Loneragan, J. F. Sensitivity of annual species of manganese toxicity as affected by calcium and pH. *Australian Journal of Agricultural Research,* 1970, 21, p. 223 – 232.

Rogiers, S. Y. et al. Mineral sinks within ripening grape berries (*Vitis vinifera* L.). *Vitis*, 2006, 45, p. 115 – 123.

Romero et al. Diagnóstico nutricional de *Vitis vinífera* L. cv. Tempranillo en la D. O. Ca. Rioja. Niveles críticos preliminares. *Zubía Monográfico,* 2004 – 2005, 16 – 17, 41 – 58.

Romheld, V. y Marschner, H. Function of micronutrients in plants. En: *Micronutrient in agriculture*. Editores: Mortvedt, J. J.et al. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1991, p. 297 238.

Roubelakis-Angelakis, K. A. Molecular Biology and Biotechnology of the Grapevine. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer, 2001.

Rubio, J. A. et al. Identificación de variedades autóctonas de Castilla y León. *Vida Rural,* 2003, 166, p. 36 – 42.

Saeed, M. y Fox, R. L. Influence of phosphate fertilization on zinc adsorption by tropical soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, 43, p. 683 – 686.

Sah, R. N., Mikkelsen, D. S. y Hafez, A. A. Phosphorus behavior in floodeddrained soils. I. Iron transformation and phosphorus sorption. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53, p. 1723 – 1729.

Sandermann, G. and Boger, P. The enzymatological function of heavy metals and their role in the electron transfer processes of plants. En: *Encyclopedia of plant physiology*, New Ser. Vol. 15A. Editores: Lauchli, A. y Bicleski, R. L. Berlin: Springer- Verlag, 1983, p. 563 – 596.

Sasaki, M. et al. Early events induced by aluminium stress in elongation cells of wheat root. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1997, 43, p. 1009 - 1014.

Sattelmacher, B. The apoplast and its significance for plant mineral nutrition. *New Phytologist*, 2001, 149, p. 167 – 192.

Schachtman, D. P. y Shin, R. Nutrient sensing and signaling: NPKS. *Annual Review of Plant Biology*, 2007, 58, p. 47 – 69.

Sheldon, A. R. y Menzies, N. W. The effect of copper toxicity on the growth and root morphology of Rhodes grass (*Chloris gayana* Knuth.) in resin buffered solution culture. *Plant and Soil,* 2005, 278, 341 – 349.

Schmidt, W. Iron solutions: acquisition strategies and signaling pathways in plants. *Trends in Plant Science*, 2003, 8, p. 188 – 193.

Schnitzer, M. y Skinner, S. I. M. Organic metallic interactions in soils. Stability constants of Pb^{2+}, Ni^{2+}, Mn^{2+}, Co^{2+}, Ca^{2+} and Mg^{2+} fulvic acid complex. *Soil Science,* 1967, 103, p. 247 – 252.

Schnitzer, M. y Kerndorff, H., Reactions of fulvic acid with metal ions. *Water, Air and Soil Pollution*, 1981, 15, p. 97 – 108.

Schönherr, J. Calcium chloride penetrates plant cuticles via aqueous pores. *Planta*, 2000, 212, p. 112 – 118.

Schreiber, L. et al. Effect of humidity on culticular water permeability of isolated culticular membranes and leaf disks. *Planta*, 2001, 214, p. 274 – 282.

Schreiner, R. P., Scagel, C. F. y Baham, J. Nutrient uptake and distribution in a mature "Pinot noir" vineyard. *HortScience*, 2006, 41, p. 336 – 345.

Schroeder, J. I. et al. Guard cell signal transduction. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology.* 2001, 52, p. 627 – 658.

Schulze, E.-D., Beck, E. y Müller-Hohenstein, Klaus. *Plant Ecology*. Editor: Czeschlik. Berlin, Germany: Springer, 2005.

Schwab, A. P. y Lindsay, W. L. Effect of redox on the solubility and availability of iron. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47, p. 201 – 205.
Schwarz, G., & Mendel, R. R. Molybdenum cofactor biosynthesis and molybdenum enzymes. *Annual Review of Plant Biology*, 2006, 57, p. 623 – 647.

Schwartz, S. y Bar-Yosef, B. Magnesium uptake by tomato plants as affected by Mg and Ca concentration in solution culture and plant age. *Soil Science Society of America Journal,* 1983, 75, p. 267 – 272.

Seckback, J. Ferreting out the secrets of plant ferritin: A review. *Journal of Plant Nutrition*, 1982, 5, p. 369 – 394.

Sharpe, R. R. y Harper, L. A. Apparent atmospheric nitrogen loss from hydroponically grown corn. *Agronomy Journal*, 1997, 89, p. 605 – 609.

Sharpe, N. R., De Veaux, R. D. y Velleman, P. F. *Business statistics,* second edition. Boston, Massachusetts: Addison Wesley, 2010.

Shaul, O. Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. *Biometals*, 2002, 15, p. 309 – 323.

Shiratori, K. y Miyoshi, H Relationship between acidic disease and zinc deficiency of rice plant in reclaimed saline paddy fields. *Journal of the Science of Soil and Manure,* 1971, 42, p. 384 – 389.

Shuman, L. M. The effect of soil properties on zinc adsorption by soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1975, 39, p. 454 – 458.

Shuman, L. M. Fraction method for soil microelements. *Soil Science*, 1985, 140, p. 11 – 22.

Sims, J. R. y Bingham, F. T. Retention of boron by layer silicates, sesquioxides, and soil minerals. I. Layer silicates. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1967, 31, p. 728 – 732.

Singh, B. B. y Jones, J. P. Phosphorus sorption and desorption characteristics of soil as affected by organic residues. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40, p. 389 – 394.

Singh, J. P., Dahiya, D. J. y Narwal, R. P. Boron uptake and toxicity in wheat in relation to zinc supply. *Fertilizer Research,* 1990, 24, p. 105 – 110.

Sinclair, T. R. y Horie, T. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: A review. *Crop Science*, 1989, 29, p. 90 – 98.

Skinner, P. W., Cook, J. A. y Matthews, M. A. Responses of grapevine cvs. Chenin blanc and Chardonnay to phosphorus fertilizer applications under phosphorus-limited conditions. *Vitis*, 1988, 27, p. 95 – 109.

Smith, S. E., Dickson, S. y Smith, F. A. Nutrient transfer in arbuscular mycorrhizas: how are fungal and plant processes integrated? *Australian Journal of Plant Physiology*, 2001, 28, p. 683 – 694.

Soderberg, K. y Compton, J. Dust as a nutrient source for fynbos ecosystems. *South Africa. Ecosystems*, 2007, 10, p. 550 – 561.

Soil Science Society of America. *Glossary of soil science terms.* Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1997.

Soliman, M. F., Kostandi, S. F. y van Beusichem, M. L. Influence of sulfur and nitrogen fertilizer on the uptake of iron, manganese, and zinc by corn plants in calcareous soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis,* 1992, 23, p. 1289 – 1300.

Sparrow, D. H. y Graham, R. D. Susceptibility of zinc deficient wheat plants to colonization by *Fusarium graminearum* Schw. Group 1. *Plant Soil,* 1988, 112, p. 261 – 266.

Spear, S. N., Edwards, D. G. y Asher, C. J. Response of cassava, sunflower and maize to potassium concentration in solution. III. Interactions between potassium, calcium and magnesium. *Field. Crops Res*, 1978, 1, p. 375 – 389.

Stevens, J. P. *Applied multivariate statistics for the social sciences,* fourth edition. Hillsdale, New Jersey: Erlbaum, 2002.

Stevenson, F. J. Origin and distribution of nitrogen in soil. En: *Nitrogen in agricultural soils*. Editor: Stevenson, F. J. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1982, p. 1 - 42.

Stevenson, F. J. *Cycles of soil: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur and micronutrients*. New York: John Wiley, 1986.

Stitt, M. Limitation of photosynthesis by carbon metabolism. I. Evidence for excess electron transport capacity in leaves carrying out photosynthesis in saturating light and CO_2. *Plant Physiology*, 1986, 81, p. 1115 – 1122.

Sumner, M. E. y Farina, M. P. W. Phosphorus interactions with other nutrients and lime in field cropping systems. *Advanced Soil Science*, 1986, 5, p. 201 – 236.

Sumner, M.E., Fey, M.V. y Noble, A.D. Nutrient status and toxicity problems in acid soils. En: B Ulrich, ME Sumner, eds. *Soil Acidity*. Editores: Ulrich, B. y Sumner, M. E. Berlin: Springer-Verlag, 1991, p 149 - 182.

Suzuki, A. Metabolism and physiology of sulfur. En: *Science of the rice plant: Physiology*, Vol. 2. Editores: Matsuo, T et al. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1995, p. 395 – 401.

Swietlik, D. Interaction between zinc deficiency and boron toxicity on growth and mineral nutrition of sour orange seedlings. *Journal of Plant Nutr*ition, 1995, 18, p. 1191 – 1207.

Tabachnick, B. G. y Fidell, L. S. *Using multivariate Statistics,* fifth edition. Boston, Massachusetts: Allyn & Bacon, 2007.

Tabatabai, M. A. Sulfur. In: *Methods of soil analysis*, Part 2, 2nd edition. Editor: Page, A. L. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1982, p. 501 – 583.

Tabatabai, M. A. y Bremner, J. M. Distribution of total and available sulfur in selected soils and soil profiles. *Agronomy Journal,* 1972, 64, p. 40 – 44.

Taiz, L. y Zeiger, E. *Plant Phisiology*, third edition. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, 2002.

Tan, K. H. *Principles of soil chemistry,* third edition. New York, New York: Marcel Dekker, 1998.

Takano, J., Miwa, K. y Fujiwara, T. Boron transport mechanisms: collaboration of channels and transporters. *Trends in Plant Science*, 2008, 13, p. 451 – 457.

Takei, K. et al. Multiple routes communicating nitrogen availability from roots to shoots: a signal transduction pathway mediated by cytokinin. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53, p. 971 – 977.

Tesic, D., Keller, M. y Hutton, R. Influence of vineyard floor management practices on grapevine growth, yield, and fruit composition. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2007, 58, p. 1 – 11.

Tester, M., y Leigh, R. A. Partitioning of nutrient transport processes in roots. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52, p. 445 – 457.

Thompson, I. A. y Huber, D. M. Manganese and plant disease. En: *Mineral nutrition and plant disease*. Editores: Datnoff, L. E., Elmer, W. H. y Huber, D. M. St. Paul, Minnesota: The American Phytopathological Society, 2007, p. 139 – 153.

Thornton, I. Copper in soils and sediments. En: *Copper in the environment, Part 1, Ecological Cycling*. Editor: Nriaju, J. O. New York: John Wiley and Sons, 1979, p. 172 – 216.

Tiller, K. G. Stability of hectorite in weakly acidic solutions. III. Adsorption of heavy metal cations and hectorite solubility. *Clay Mineralogy,* 1968, 7, p. 409 – 419.

Tisdale, S. L., Nelson, W. L. y Beaton, J. D. *Soil fertility and fertilizers*, 4th edition. New York: MacMillan Publishing Company, 1985.

Toselli, M. et al. Response of potted grapevines to increasing soil copper concentration. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2009, 15, p. 85 – 92.

Tracy, P. W. et al. Carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur mineralization in plow and no-till cultivation. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54, p. 457 – 461.

Tromp, A. y De Klerk, C. A. Effect of copper oxychloride on the fermentation of must and on wine quality. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 1988, 9, p. 31 – 36.

USDA. *Keys to Soil Taxonomy,* Eleventh Edition. Washington, D. C.:United States Department of Agriculture, 2010.

Usuda, H. y Shimogawara, K. Phosphate deficiency in maize II. Enzyme activities. *Plant and Cell Physiology*, 1991, 32, p. 1313 – 1317.

Van Leeuwen, et al. Influence of climate, soil, and cultivar on terroir. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2004, 55, p. 207 – 217.

Varanini, Z. y Maggioni, A. Iron reduction and uptake by grapevine roots. *Journal of Plant Nutrition*, 1982, 5, p. 521 – 529.

Villalbí, I. y Vidal, M. *Análisis de suelos y foliares: interpretación y fertilización*. Barcelona: Monografías de la obra agrícola de la fundación Caja de Pensiones, 1988.

Vitousek, P.M. *Nutrient cycling and limitation: Hawaii as a model system*. Princeton: Princeton University Press, 2004.

Voogt W y Sonneveld C Interactions between nitrate (NO_3) and chloride (Cl) in nutrient solutions for substrate grown tomato. *Acta Horticulturae*, 2004, 644, p. 359 – 368.

Wada, K. Allophane and imogolite. En: *Minerals in Soil Environments*, 2nd ed. Editors: Dixon, J.B. y Weed, S.B. Madison, Wiscosin: Soil Science Society of America, 1989, p. 1051 – 1087.

Walker, T.W. y Syers, J.K. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 1976, 15, p. 1 – 9.

Werner, T. et al. Cytokinin-deficient transgenic Arabidopsis plants show multiple developmental alterations indicating opposite functions of cytokinins in the regulation of shoot and root meristem activity. *The Plant Cell*, 2003, 15, p. 2532 – 2550.

Westermann, D. T., Jackson, T. L. y Moore, D. P. Effect of potassium salts on extractable soil manganese. *Soil Science Society American Proceedings,* 1971, 35, p. 43 – 46.

Wilkinson, S. y Davies, W. J. ABA-based chemical signalling: the co-ordination of responses to stress in plants. *Plant, Cell and Environment*, 2002, 25, p. 195 – 210.

Wilkinson, S. R. Effect of soil application magnesium and other minerals on plant magnesium content. En: *Role of magnesium in animal nutrition*. Editor: Fonte, J. P. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute Press, 1983, p. 61 – 79.

Wilkinson, S. R., Grunes, D. L. y Sumner, M. E. 2000. Nutrient interactions in soil andplant nutrition. En: *Handbook of soil science*. Editor: Sumner, M. E. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2000, p. 89 – 112.

Wolf, T.K,. Heaseler, C.W. y Bergman, E.L. Growth and Foliar Elemental Composition of Seyvel Blanc Grapevines as Affected by Four Nutrient Solution Concentration of Nitrogen, Potassium and Magnesium. *American Journal of Enolology and Viticulture*, 1983, 34:4, p. 271 - 277

Wood, C. W. Agriculture phosphorus and water quality: An overview. En: *Soil testing for phosphorus: Environmental uses and implications.* Editor: Thomas, J. Newark, Delaware: University of Delaware, 1998, p. 5 - 12.

Woodrow, I. E. y Berry, J. A. Enzymatic regulation of photosynthetic CO2 fixation in C3 plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1988, 39, p. 533 – 594.

Woolhouse, H. M. y Walker, S. The physiological basis of copper toxicity and copper tolerance in higher plants. En: *Copper in soils and plants.* Editores: Loneragan, J. F., Robson, A. D. y Graham, R. D. Sydney, Australia: Academic Press, 1981, p. 265 – 285.

Yamamoto, Y. et al. Quantitative stimation of aluminium toxicity in cultured tobacco cells: Correlation between aluminium uptake and growht inhibition. *Plant Cell Physiology*, 1994, 35, p. 575 - 583.

Yanai, J. et al. Effects of the chemical form of inorganic nitrogen fertilizers on the dynamics of the soil solution composition and on nutrient uptake by wheat. *Plant and Soil*, 1998, 202, p. 263 – 270.

Yermiyahu, U., Keren, R. y Chen, Y. Effect of composted organic matter on boron uptake by plants. *Soil Science Society of America Journal,* 2001, 65, p. 1436 – 1441.

Yruela, I. Copper in plants: acquisition, transport and interactions. *Functional Plant Biology*, 2009, 36, p. 409 – 430.

Zhang, G., Hoddinott, J. y Taylor, G. J. Characterization of 1-3- glucano (callosa) sinthesys in roots of *Triticum aestivum* in response to aluminium toxicity. Journal of Plant Physiology, 1994, 144, p. 229 - 234.

Zhu, J. K. Salt and drought stress signal transduction in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 2002, 53, p. 247 – 273.

ANEXO I

Resultados de los análisis de suelos

ANEXO I. ANÁLISIS DE SUELOS

Muestra	ARENA (%)	LIMO (%)	ARCILLA (%)	pH H_2O	C.E. ($dS \cdot m^{-1}$)	% M.O.	P ($mg \cdot kg^{-1}$)
J 50	50,3	25,3	24,4	5,38	0,02	0,44	4,20
J 65	44,3	17,3	38,4	6,67	0,03	1,04	6,40
CM 15	53,3	24,0	22,7	6,44	0,03	0,67	14,10
CM 25	60,3	21,3	18,4	5,37	0,04	0,50	32,00
CM 90	47,3	22,0	30,7	6,34	0,03	0,71	20,90
H 10	37,3	16,0	46,7	6,31	0,02	0,37	6,30
H 240	47,3	24,0	28,7	7,48	0,09	0,64	11,10
H 325	47,3	20,0	32,7	6,88	0,04	0,74	7,10
J 50	50,3	25,3	24,4	6,49	0,06	0,40	1,70
J 65	44,3	17,3	38,4	6,46	0,04	0,54	7,80
CM 15	53,3	24,0	22,7	7,65	0,11	0,50	3,10
CM 25	60,3	21,3	18,4	6,04	0,05	0,61	22,30
CM 90	47,3	22,0	30,7	5,67	0,04	0,47	11,00
H 10	37,3	16,0	46,7	6,19	0,02	0,44	10,30
H 240	47,3	24,0	28,7	7,41	0,07	0,50	4,70
H 325	47,3	20,0	32,7	7,08	0,04	0,61	3,20
J 50	50,3	25,3	24,4	6,23	0,04	0,58	5,20
J 65	44,3	17,3	38,4	7,06	0,16	0,48	12,20
CM 15	53,3	24,0	22,7	6,24	0,03	0,48	14,00
CM 25	60,3	21,3	18,4	5,65	0,02	0,55	31,30
CM 90	47,3	22,0	30,7	5,78	0,04	0,48	7,40
H 10	37,3	16,0	46,7	6,06	0,03	0,48	4,90
H 240	47,3	24,0	28,7	7,65	0,06	0,48	3,90
H 325	47,3	20,0	32,7	7,21	0,03	0,85	6,00
J 50	50,3	25,3	24,4	7,24	0,08	0,82	5,90
J 65	44,3	17,3	38,4	7,68	0,07	0,52	6,60
CM 15	53,3	24,0	22,7	6,19	0,03	0,45	8,50
CM 25	60,3	21,3	18,4	5,61	0,05	0,62	47,80
CM 90	47,3	22,0	30,7	5,47	0,03	0,38	16,60
H 10	37,3	16,0	46,7	5,75	0,03	0,62	8,40
H 240	47,3	24,0	28,7	7,57	0,03	0,62	10,90
H 325	47,3	20,0	32,7	7,13	0,05	0,72	9,50
J 50	50,3	25,3	24,4	7,16	0,19	0,43	28,80
J 65	44,3	17,3	38,4	6,94	0,12	0,43	10,00
CM 15	53,3	24,0	22,7	7,08	0,06	0,53	9,20
CM 25	60,3	21,3	18,4	6,59	0,06	0,66	56,90
CM 90	47,3	22,0	30,7	6,80	0,06	0,50	23,60
H 10	37,3	16,0	46,7	5,82	0,05	0,36	6,50
H 240	47,3	24,0	28,7	6,27	0,06	0,40	20,30
H 325	47,3	20,0	32,7	8,06	0,14	0,66	5,20

Tabla nº 20: Análisis de suelos. Año 2007

Muestra	Ca ($cmol(+) \cdot kg^{-1}$)	Mg ($cmol(+) \cdot kg^{-1}$)	K ($cmol(+) \cdot kg^{-1}$)	Fe ($mg \cdot kg^{-1}$)	Mn ($mg \cdot kg^{-1}$)	Cu ($mg \cdot kg^{-1}$)	Zn ($mg \cdot kg^{-1}$)	Al ($cmol(+) \cdot kg^{-1}$)
J 50	1,46	0,27	0,21	87,06	35,16	0,68	0,32	0,367
J 65	5,70	1,07	0,24	33,22	43,45	1,60	0,18	0,005
CM 15	2,82	0,59	0,49	147,08	78,12	1,69	0,42	0,002
CM 25	2,27	0,55	0,31	226,60	61,47	1,59	1,10	0,377
CM 90	2,95	0,63	0,29	182,78	68,44	3,77	0,54	0,017
H 10	3,77	0,87	0,24	32,95	54,15	1,49	0,10	0,019
H 240	8,61	1,44	0,20	22,07	24,47	0,83	0,10	0,041
H 325	5,11	1,13	0,18	33,11	49,89	1,57	0,11	0,016
J 50	8,05	2,21	0,40	11,20	12,52	0,30	0,05	0,106
J 65	7,22	1,52	0,34	15,73	24,24	0,44	0,02	0,075
CM 15	3,45	0,42	0,29	36,57	36,64	1,09	0,20	0,003
CM 25	2,89	0,63	0,38	87,96	33,44	1,09	0,44	0,007
CM 90	1,71	0,49	0,25	147,81	52,20	1,03	0,55	0,073
H 10	2,32	0,57	0,30	34,84	41,88	1,97	0,35	0,052
H 240	10,20	2,68	0,41	15,10	11,77	0,60	0,10	0,010
H 325	4,85	1,51	0,17	17,96	30,38	0,88	0,16	0,010
J 50	5,15	1,49	0,52	30,06	24,96	1,15	0,28	0,101
J 65	9,75	0,98	0,28	22,74	43,27	1,18	0,35	0,018
CM 15	1,85	0,43	0,54	143,82	85,12	1,89	0,78	0,067
CM 25	2,55	0,31	0,34	175,37	54,66	1,86	2,02	0,191
CM 90	3,48	1,04	0,31	31,18	51,66	1,06	0,32	0,231
H 10	6,30	1,46	0,33	23,49	41,96	1,22	0,42	0,043
H 240	10,27	1,74	0,34	8,27	12,13	0,72	0,25	0,013
H 325	6,00	1,43	0,29	36,71	30,03	1,71	0,70	0,008
J 50	3,89	1,18	0,44	21,72	38,18	2,36	0,10	0,008
J 65	7,25	1,21	0,36	8,93	26,49	0,76	0,10	0,009
CM 15	2,76	0,72	0,34	22,27	50,77	0,78	0,10	0,028
CM 25	2,47	0,40	0,44	108,88	49,32	1,60	0,32	0,093
CM 90	2,13	0,57	0,30	45,64	50,37	1,88	0,10	0,214
H 10	3,84	1,56	0,56	33,51	49,63	1,67	0,10	0,170
H 240	6,02	1,17	0,28	14,48	29,14	0,72	0,10	0,017
H 325	4,59	1,71	0,30	22,90	41,29	0,95	0,10	0,010
J 50	6,82	0,57	0,35	13,93	37,73	0,60	0,10	0,008
J 65	7,15	0,88	0,29	11,12	27,53	0,58	0,10	0,027
CM 15	1,28	0,33	0,45	30,55	34,07	1,50	0,10	0,012
CM 25	2,07	0,28	0,50	133,87	36,82	1,70	1,18	0,069
CM 90	1,53	0,75	0,33	17,13	28,29	1,00	0,10	0,031
H 10	1,72	0,29	0,41	34,93	27,66	1,95	0,14	0,046
H 240	2,29	0,38	0,25	31,25	17,38	0,74	0,10	0,012
H 325	6,20	1,37	0,28	10,74	19,63	0,84	0,10	0,015

Tabla nº 21: Análisis de suelos. Año 2007 (Continuación)

Muestra	ARENA (%)	LIMO (%)	ARCILLA (%)	pH H_2O	C.E. ($dS \cdot m^{-1}$)	% M.O.	P ($mg \cdot kg^{-1}$)
J 50	50,3	25,3	24,4	6,45	0,07	0,68	13,60
J 65	44,3	17,3	38,4	7,36	0,17	0,81	12,20
CM 15	53,3	24,0	22,7	6,68	0,03	0,55	11,60
CM 25	60,3	21,3	18,4	5,41	0,07	0,51	36,40
CM 90	47,3	22,0	30,7	5,99	0,03	0,68	8,30
H 10	37,3	16,0	46,7	5,77	0,03	0,58	29,30
H 240	47,3	24,0	28,7	7,91	0,16	0,45	7,70
H 325	47,3	20,0	32,7	7,03	0,05	0,55	46,40
J 50	50,3	25,3	24,4	6,13	0,04	0,43	5,70
J 65	44,3	17,3	38,4	6,70	0,06	0,46	5,60
CM 15	53,3	24,0	22,7	6,76	0,05	0,43	11,10
CM 25	60,3	21,3	18,4	6,14	0,06	0,43	34,65
CM 90	47,3	22,0	30,7	5,92	0,04	0,56	7,30
H 10	37,3	16,0	46,7	6,73	0,04	0,59	14,35
H 240	47,3	24,0	28,7	6,83	0,06	0,46	7,45
H 325	47,3	20,0	32,7	6,70	0,03	0,79	6,05
J 50	50,3	25,3	24,4	7,65	0,14	0,75	6,30
J 65	44,3	17,3	38,4	7,49	0,03	0,45	7,00
CM 15	53,3	24,0	22,7	5,96	0,04	0,45	10,70
CM 25	60,3	21,3	18,4	6,10	0,03	0,58	41,00
CM 90	47,3	22,0	30,7	6,17	0,04	0,65	5,80
H 10	37,3	16,0	46,7	6,12	0,04	0,61	4,70
H 240	47,3	24,0	28,7	6,15	0,03	0,55	9,10
H 325	47,3	20,0	32,7	7,39	0,10	0,58	5,90
J 50	50,3	25,3	24,4	8,08	0,04	0,97	5,10
J 65	44,3	17,3	38,4	7,48	0,04	0,58	4,20
CM 15	53,3	24,0	22,7	6,10	0,08	0,64	11,50
CM 25	60,3	21,3	18,4	5,81	0,03	0,58	28,30
CM 90	47,3	22,0	30,7	6,24	0,04	0,68	8,80
H 10	37,3	16,0	46,7	6,20	0,02	0,61	24,00
H 240	47,3	24,0	28,7	7,95	0,08	0,64	5,80
H 325	47,3	20,0	32,7	7,54	0,03	0,81	6,20
J 50	50,3	25,3	24,4	6,54	0,04	0,71	3,40
J 65	44,3	17,3	38,4	6,75	0,03	0,67	4,30
CM 15	53,3	24,0	22,7	6,36	0,03	0,54	5,00
CM 25	60,3	21,3	18,4	5,78	0,04	0,58	18,90
CM 90	47,3	22,0	30,7	5,78	0,04	0,71	7,50
H 10	37,3	16,0	46,7	6,79	0,04	0,71	7,80
H 240	47,3	24,0	28,7	7,56	0,11	0,64	3,70
H 325	47,3	20,0	32,7	6,90	0,05	0,81	3,60

Tabla nº 22: Análisis de suelos. Año 2008

Muestra	Ca ($cmol(+) \cdot kg^{-1}$)	Mg ($cmol(+) \cdot kg^{-1}$)	K ($cmol(+) \cdot kg^{-1}$)	Fe ($mg \cdot kg^{-1}$)	Mn ($mg \cdot kg^{-1}$)	Cu ($mg \cdot kg^{-1}$)	Zn ($mg \cdot kg^{-1}$)	Al ($cmol(+) \cdot kg^{-1}$)
J 50	2,97	0,33	0,25	62,03	38,52	0,77	0,87	0,003
J 65	14,43	1,30	0,43	11,13	22,13	1,14	0,58	0,003
CM 15	2,27	0,55	0,51	60,70	35,78	1,17	1,07	0,003
CM 25	2,09	0,48	0,37	131,79	29,52	1,30	1,47	0,285
CM 90	5,23	1,29	0,36	12,89	20,59	1,70	0,34	0,032
H 10	4,54	1,25	0,48	16,40	30,00	0,66	0,29	0,380
H 240	15,82	1,83	0,18	8,95	9,50	0,47	0,60	0,003
H 325	4,36	1,15	0,39	15,12	15,04	0,39	0,44	0,003
J 50	3,67	0,80	0,29	18,65	32,80	1,19	0,23	0,138
J 65	7,44	0,92	0,17	23,29	44,10	0,82	0,35	0,030
CM 15	3,10	0,49	0,36	39,83	55,26	1,50	0,18	0,009
CM 25	2,39	0,50	0,26	96,57	42,99	2,33	1,92	0,120
CM 90	2,93	0,64	0,17	25,09	43,75	1,14	0,35	0,102
H 10	5,82	1,63	0,30	28,75	42,80	0,77	0,03	0,022
H 240	5,15	0,84	0,15	75,94	27,90	1,58	0,23	0,013
H 325	3,12	0,38	0,07	29,33	49,20	1,12	0,31	0,019
J 50	5,07	0,89	0,42	20,57	38,37	1,01	0,25	0,007
J 65	5,43	0,48	0,20	19,68	51,63	0,68	0,15	0,008
CM 15	2,69	0,54	0,51	54,57	64,97	1,41	0,43	0,012
CM 25	1,52	0,28	0,39	104,57	45,48	2,32	2,51	0,153
CM 90	3,65	0,64	0,44	28,94	49,70	1,15	0,66	0,031
H 10	5,00	1,32	0,34	25,09	41,99	0,58	0,09	0,039
H 240	2,53	0,27	0,26	85,50	30,80	1,30	0,57	0,080
H 325	6,45	1,12	0,24	28,48	50,09	0,89	0,30	0,012
J 50	4,46	1,62	0,64	32,11	43,26	1,75	0,74	0,217
J 65	8,19	1,56	0,24	18,89	34,14	0,47	0,10	0,152
CM 15	1,85	0,60	0,55	105,30	66,80	1,39	1,60	0,265
CM 25	1,72	0,51	0,44	111,50	43,17	1,94	2,52	0,537
CM 90	4,50	1,60	0,48	28,02	37,26	1,27	0,65	0,373
H 10	2,70	0,90	0,37	66,76	51,10	1,29	0,57	0,476
H 240	8,51	2,33	0,39	3,27	7,19	0,50	0,27	0,198
H 325	6,57	2,13	0,27	12,35	33,56	0,97	0,55	0,184
J 50	1,97	0,41	0,30	81,65	32,74	0,79	0,48	0,130
J 65	4,50	0,77	0,22	14,47	30,33	1,16	0,14	0,519
CM 15	1,52	0,40	0,45	89,47	49,04	1,36	0,93	0,118
CM 25	1,95	0,67	0,35	91,74	31,90	0,39	0,96	0,303
CM 90	2,19	0,77	0,27	33,35	33,37	0,10	0,17	0,683
H 10	3,19	1,46	0,33	22,09	19,89	0,04	0,10	0,459
H 240	13,28	2,25	0,38	7,13	7,10	0,12	0,07	0,251
H 325	5,36	1,50	0,24	15,28	25,11	0,10	0,25	0,399

Tabla nº 23: Análisis de suelos. Año 2008 (Continuación)

Muestra	ARENA (%)	LIMO (%)	ARCILLA (%)	pH H_2O	C.E. ($dS \cdot m^{-1}$)	% M.O.	P ($mg \cdot kg^{-1}$)
J 50	50,3	25,3	24,4	6,00	0,02	0,49	9,10
J 65	44,3	17,3	38,4	7,50	0,12	0,46	1,60
CM 15	53,3	24,0	22,7	6,10	0,04	0,55	1,80
CM 25	60,3	21,3	18,4	5,69	0,05	0,46	2,80
CM 90	47,3	22,0	30,7	5,66	0,03	0,62	1,80
H 10	37,3	16,0	46,7	6,16	0,03	0,65	1,90
H 240	47,3	24,0	28,7	7,34	0,07	0,69	6,00
H 325	47,3	20,0	32,7	6,36	0,03	0,85	1,40
J 50	50,3	25,3	24,4	6,26	0,04	0,61	26,60
J 65	44,3	17,3	38,4	7,33	0,08	0,58	1,90
CM 15	53,3	24,0	22,7	6,06	0,05	0,45	6,70
CM 25	60,3	21,3	18,4	5,62	0,03	0,61	39,90
CM 90	47,3	22,0	30,7	6,35	0,05	0,51	9,40
H 10	37,3	16,0	46,7	6,83	0,09	0,48	9,40
H 240	47,3	24,0	28,7	7,22	0,07	0,50	3,40
H 325	47,3	20,0	32,7	6,88	0,03	0,47	4,98
J 50	50,3	25,3	24,4	6,63	0,08	0,56	7,50
J 65	44,3	17,3	38,4	6,72	0,06	0,30	18,00
CM 15	53,3	24,0	22,7	6,25	0,03	0,49	8,60
CM 25	60,3	21,3	18,4	7,22	0,06	0,59	15,40
CM 90	47,3	22,0	30,7	5,73	0,03	0,63	13,00
H 10	37,3	16,0	46,7	6,13	0,07	0,86	4,90
H 240	47,3	24,0	28,7	7,29	0,08	0,86	7,60
H 325	47,3	20,0	32,7	6,70	0,04	0,73	9,00
J 50	50,3	25,3	24,4	7,18	0,09	0,56	2,80
J 65	44,3	17,3	38,4	6,90	0,10	0,59	15,20
CM 15	53,3	24,0	22,7	6,30	0,02	0,43	6,60
CM 25	60,3	21,3	18,4	5,40	0,04	0,90	42,50
CM 90	47,3	22,0	30,7	6,17	0,04	0,79	10,90
H 10	37,3	16,0	46,7	6,64	0,03	0,66	5,20
H 240	47,3	24,0	28,7	7,44	0,08	0,79	7,10
H 325	47,3	20,0	32,7	6,74	0,07	0,70	2,80
J 50	50,3	25,3	24,4	6,94	0,06	0,53	24,90
J 65	44,3	17,3	38,4	6,60	0,05	0,50	18,50
CM 15	53,3	24,0	22,7	5,93	0,04	0,31	3,70
CM 25	60,3	21,3	18,4	5,94	0,17	1,06	27,90
CM 90	47,3	22,0	30,7	5,73	0,03	0,60	8,80
H 10	37,3	16,0	46,7	6,01	0,07	0,56	3,20
H 240	47,3	24,0	28,7	6,41	0,03	0,46	18,40
H 325	47,3	20,0	32,7	6,96	0,05	0,56	7,40

Tabla nº 24: Análisis de suelos. Año 2009

Muestra	Ca ($cmol(+) \cdot kg^{-1}$)	Mg ($cmol(+) \cdot kg^{-1}$)	K ($cmol(+) \cdot kg^{-1}$)	Fe ($mg \cdot kg^{-1}$)	Mn ($mg \cdot kg^{-1}$)	Cu ($mg \cdot kg^{-1}$)	Zn ($mg \cdot kg^{-1}$)	Al ($cmol(+) \cdot kg^{-1}$)
J 50	2,44	0,58	0,24	23,41	37,00	0,48	0,25	1,230
J 65	13,46	1,38	0,54	9,35	13,21	0,45	0,26	0,410
CM 15	1,76	0,50	0,52	140,90	52,36	1,44	1,39	0,170
CM 25	1,87	0,58	0,42	152,14	33,10	1,48	1,76	1,360
CM 90	2,00	0,64	0,36	148,39	41,90	1,89	1,17	1,720
H 10	2,71	1,17	0,55	148,00	31,62	1,40	0,94	0,630
H 240	14,91	2,86	0,32	9,75	11,69	0,34	0,25	0,550
H 325	5,21	1,61	0,21	89,31	32,93	1,43	0,47	0,510
J 50	3,76	1,29	0,58	24,65	28,57	0,90	0,45	0,680
J 65	10,19	1,35	0,35	8,57	17,13	0,66	0,22	0,380
CM 15	2,75	1,00	0,47	25,57	51,26	1,19	0,35	0,920
CM 25	1,86	0,49	0,36	71,50	47,56	1,78	1,37	1,490
CM 90	3,31	0,87	0,37	20,88	37,86	1,18	0,40	0,080
H 10	4,38	1,09	0,28	20,89	36,90	0,87	0,19	1,050
H 240	10,93	1,87	0,32	10,12	19,71	0,55	0,13	0,690
H 325	5,94	1,76	0,23	18,92	36,04	1,20	0,39	0,330
J 50	4,43	1,10	0,36	28,99	36,00	0,52	0,10	0,810
J 65	8,60	1,60	0,37	22,66	32,88	0,55	0,21	0,280
CM 15	1,27	0,48	0,54	36,45	56,57	1,08	0,55	1,160
CM 25	1,74	0,64	0,42	50,73	49,75	1,79	0,93	0,280
CM 90	1,76	0,76	0,42	97,85	50,82	1,99	0,91	2,020
H 10	5,94	2,04	0,63	15,92	32,70	1,04	0,44	0,080
H 240	6,84	2,49	0,55	6,93	13,04	0,86	0,52	0,040
H 325	6,14	2,30	0,30	19,43	21,38	0,82	0,44	0,290
J 50	5,62	1,79	0,49	14,78	28,58	0,70	0,22	0,350
J 65	6,84	2,17	0,43	11,07	24,82	0,75	0,56	0,640
CM 15	1,70	0,64	0,53	48,89	59,82	1,01	0,63	0,180
CM 25	1,43	0,50	0,43	89,71	49,50	1,86	1,26	3,110
CM 90	3,38	1,42	0,60	31,77	41,92	2,32	1,42	0,230
H 10	2,82	1,58	0,50	23,30	44,20	2,11	0,79	0,320
H 240	6,05	2,60	0,61	6,76	25,75	0,97	0,86	0,710
H 325	3,58	1,82	0,37	36,95	41,35	0,96	0,62	0,630
J 50	3,23	0,26	0,40	21,39	28,56	0,80	0,35	1,292
J 65	3,99	0,52	0,26	73,82	32,33	2,03	1,97	0,700
CM 15	2,05	0,76	0,28	36,01	22,95	0,88	0,39	0,157
CM 25	3,06	0,56	0,41	78,64	35,60	2,09	0,94	0,423
CM 90	1,50	0,24	0,24	13,59	29,98	1,10	0,49	0,305
H 10	3,29	0,85	0,37	22,11	40,16	0,69	0,32	0,102
H 240	3,27	0,90	0,23	33,99	15,99	0,54	0,41	0,679
H 325	5,00	1,50	0,24	13,56	24,62	0,47	0,37	0,140

Tabla nº 25: Análisis de suelos. Año 2009 (Continuación)

ANEXO II

Resultados de los análisis de limbos

ANEXO II. ANÁLISIS DE LIMBOS

Muestra	Muestreo	P(%) L	Ca(%) L	Mg(%) L	K(%) L
J 50	1	0,11	0,42	0,15	1,25
J 65	1	0,19	0,25	0,17	1,00
CM 15	1	0,12	0,48	0,15	1,40
CM 25	1	0,03	0,75	0,16	1,32
CM 90	1	0,21	0,31	0,15	1,45
H 10	1	0,11	0,59	0,20	1,28
H 240	1	0,19	0,34	0,21	0,91
H 325	1	0,18	0,46	0,20	0,97
J 50	2	0,11	0,78	0,20	1,09
J 65	2	0,13	0,99	0,20	1,32
CM 15	2	0,08	0,29	0,20	1,14
CM 25	2	0,08	0,59	0,15	1,22
CM 90	2	0,11	0,33	0,16	1,49
H 10	2	0,11	0,86	0,21	1,02
H 240	2	0,15	0,87	0,24	1,11
H 325	2	0,08	0,35	0,26	0,74

Tabla nº 26: Análisis de limbos. Año 2007

Muestra	Muestreo	Fe($mg \cdot kg^{-1}$) L	Mn($mg \cdot kg^{-1}$) L	Zn($mg \cdot kg^{-1}$) L	Cu($mg \cdot kg^{-1}$) L	B($mg \cdot kg^{-1}$) L
J 50	1	72,70	247,00	30,30	5,50	4,40
J 65	1	43,40	136,60	19,80	6,50	13,40
CM 15	1	97,00	151,40	20,50	5,60	10,50
CM 25	1	151,10	285,70	28,50	6,80	12,20
CM 90	1	121,70	232,50	31,20	8,80	70,80
H 10	1	98,00	244,30	30,60	7,20	14,60
H 240	1	93,10	60,20	9,00	5,90	8,00
H 325	1	88,80	60,00	8,90	6,70	8,70
J 50	2	84,40	295,80	41,00	3,20	10,60
J 65	2	78,60	138,80	15,40	3,30	4,70
CM 15	2	77,30	181,30	32,00	4,60	38,10
CM 25	2	60,20	284,70	36,30	2,70	17,00
CM 90	2	77,60	403,10	40,90	3,10	42,10
H 10	2	134,30	308,90	43,30	2,80	5,50
H 240	2	77,90	53,80	8,00	3,60	6,20
H 325	2	71,40	73,00	12,70	4,00	36,00

Tabla nº 27: Análisis de limbos. Año 2007 (Continuación)

Muestra	Muestreo	P(%) L	Ca(%) L	Mg(%) L	K(%) L
J 50	3	0,12	0,54	0,19	1,14
J 65	3	0,17	0,34	0,18	1,25
CM 15	3	0,08	0,29	0,19	1,51
CM 25	3	0,13	0,60	0,21	1,49
CM 90	3	0,03	0,67	0,22	1,88
H 10	3	0,12	0,41	0,20	1,14
H 240	3	0,07	0,30	0,27	0,35
H 325	3	0,13	0,27	0,26	0,78
J 50	4	0,09	1,50	0,26	1,37
J 65	4	0,12	1,28	0,30	1,08
CM 15	4	0,14	0,33	0,27	0,95
CM 25	4	0,02	0,22	0,24	1,26
CM 90	4	0,03	0,28	0,27	1,23
H 10	4	0,12	0,40	0,24	0,92
H 240	4	0,18	0,46	0,37	1,06
H 325	4	0,11	0,44	0,28	0,75

Tabla nº 28: Análisis de limbos. Año 2008

Muestra	Muestreo	Fe($mg \cdot kg^{-1}$) L	Mn($mg \cdot kg^{-1}$) L	Zn($mg \cdot kg^{-1}$) L	Cu($mg \cdot kg^{-1}$) L	B($mg \cdot kg^{-1}$) L
J 50	3	123,00	184,50	25,20	5,80	5,00
J 65	3	56,70	122,30	28,90	7,00	9,00
CM 15	3	86,50	195,80	56,10	6,80	4,10
CM 25	3	110,40	221,10	35,90	6,00	5,00
CM 90	3	112,50	350,40	38,20	8,00	5,00
H 10	3	96,40	213,30	37,80	4,60	9,00
H 240	3	73,40	55,00	22,60	1,40	8,00
H 325	3	175,80	53,30	40,50	5,20	4,80
J 50	4	104,10	279,70	42,00	3,90	33,80
J 65	4	95,80	138,90	27,20	4,10	26,50
CM 15	4	101,70	259,50	27,90	4,50	20,14
CM 25	4	81,40	289,90	41,80	4,90	18,00
CM 90	4	106,40	398,40	32,20	5,70	17,50
H 10	4	112,90	202,90	36,60	4,30	1,60
H 240	4	105,50	146,80	38,90	7,30	14,00
H 325	4	49,70	110,30	41,80	4,70	14,60

Tabla nº 29: Análisis de limbos. Año 2008 (Continuación)

Muestra	Muestreo	P(%) L	Ca(%) L	Mg(%) L	K(%) L
J 50	5	0,12	0,57	0,20	1,20
J 65	5	0,18	0,36	0,19	1,32
CM 15	5	0,13	0,39	0,21	1,13
CM 25	5	0,13	0,64	0,22	1,59
CM 90	5	0,03	0,72	0,23	2,01
H 10	5	0,13	0,78	0,21	1,12
H 240	5	0,13	0,41	0,24	1,07
H 325	5	0,11	0,43	0,23	1,03
J 50	6	0,09	0,38	0,25	1,15
J 65	6	0,12	1,57	0,29	0,98
CM 15	6	0,08	0,92	0,22	0,85
CM 25	6	0,07	0,53	0,16	1,56
CM 90	6	0,16	0,63	0,23	1,64
H 10	6	0,13	0,64	0,25	1,05
H 240	6	0,13	0,90	0,35	1,17
H 325	6	0,09	0,63	0,25	0,90

Tabla nº 30: Análisis de limbos. Año 2009

Muestra	Muestreo	Fe($mg \cdot kg^{-1}$) L	Mn($mg \cdot kg^{-1}$) L	Zn($mg \cdot kg^{-1}$) L	Cu($mg \cdot kg^{-1}$) L	B($mg \cdot kg^{-1}$) L
J 50	5	129,15	193,73	26,46	6,09	13,25
J 65	5	59,54	128,42	30,35	7,35	9,45
CM 15	5	45,60	133,60	42,20	4,40	9,20
CM 25	5	118,13	236,58	38,41	6,42	15,35
CM 90	5	120,38	374,93	40,87	8,56	16,35
H 10	5	44,10	141,60	64,70	5,60	26,50
H 240	5	57,90	78,40	49,50	6,00	15,60
H 325	5	58,20	60,40	26,30	5,70	9,80
J 50	6	48,30	196,60	21,80	3,90	21,70
J 65	6	147,80	175,30	27,80	4,40	32,70
CM 15	6	62,50	146,90	44,10	2,90	5,50
CM 25	6	48,80	190,30	28,30	3,70	17,10
CM 90	6	58,10	178,20	42,70	3,70	47,20
H 10	6	58,30	182,50	68,70	3,50	18,20
H 240	6	74,80	89,00	55,30	4,40	19,10
H 325	6	52,70	68,00	31,20	4,20	25,60

Tabla nº 31: Análisis de limbos. Año 2009 (Continuación)

ANEXO III

Resultados de los análisis de peciolos

ANEXO III. ANÁLISIS DE PECIOLOS

Muestra	Muestreo	P(%) P	Ca(%) P	Mg(%) P	K(%) P
J 50	1	0,04	0,13	0,28	2,19
J 65	1	0,15	0,69	0,25	1,53
CM 15	1	0,07	0,90	0,20	1,99
CM 25	1	0,11	0,83	0,21	2,27
CM 90	1	0,14	0,66	0,25	2,03
H 10	1	0,12	0,51	0,27	1,91
H 240	1	0,19	0,34	0,44	1,34
H 325	1	0,18	0,53	0,34	1,19
J 50	2	0,07	1,23	0,45	1,90
J 65	2	0,16	1,08	0,46	2,16
CM 15	2	0,06	0,74	0,53	1,69
CM 25	2	0,07	0,96	0,39	2,07
CM 90	2	0,11	0,50	0,37	2,35
H 10	2	0,11	1,23	0,48	1,22
H 240	2	0,15	0,90	0,46	1,39
H 325	2	0,08	0,67	0,62	0,80

Tabla nº 32: Análisis de peciolos. Año 2007

Muestra	Muestreo	Fe($mg \cdot kg^{-1}$) P	Mn($mg \cdot kg^{-1}$) P	Zn($mg \cdot kg^{-1}$) P	Cu($mg \cdot kg^{-1}$) P	B($mg \cdot kg^{-1}$) P
J 50	1	31,30	281,70	18,00	6,40	1,20
J 65	1	27,50	130,40	18,80	6,10	3,40
CM 15	1	26,80	155,00	18,20	5,40	7,60
CM 25	1	31,00	327,20	20,30	7,70	8,60
CM 90	1	43,10	264,90	19,40	6,20	22,00
H 10	1	35,70	213,60	24,90	5,60	9,40
H 240	1	40,90	56,00	13,90	6,40	7,70
H 325	1	28,50	46,70	10,40	7,30	6,10
J 50	2	32,60	540,40	30,40	2,60	12,60
J 65	2	26,90	204,40	20,80	2,40	3,80
CM 15	2	39,30	353,00	26,70	2,50	55,70
CM 25	2	39,20	511,60	25,70	2,70	14,10
CM 90	2	39,10	662,90	31,00	2,90	14,70
H 10	2	40,80	539,50	32,00	2,50	5,20
H 240	2	34,70	52,70	19,20	2,80	7,90
H 325	2	32,90	96,90	18,90	2,00	22,10

Tabla nº 33: Análisis de peciolos. Año 2007 (Continuación)

Muestra	Muestreo	P(%) P	Ca(%) P	Mg(%) P	K(%) P
J 50	3	0,17	0,62	0,37	2,17
J 65	3	0,30	0,62	0,36	1,83
CM 15	3	0,15	0,54	0,32	2,24
CM 25	3	0,19	0,51	0,47	2,95
CM 90	3	0,03	0,86	0,33	1,75
H 10	3	0,24	0,20	0,33	1,62
H 240	3	0,22	0,69	0,53	1,19
H 325	3	0,22	0,27	0,26	0,78
J 50	4	0,11	1,58	0,48	2,15
J 65	4	0,30	0,70	0,56	1,98
CM 15	4	0,10	0,68	0,63	1,71
CM 25	4	0,13	0,60	0,47	2,26
CM 90	4	0,22	0,56	0,44	2,08
H 10	4	0,13	0,92	0,63	1,25
H 240	4	0,13	0,70	0,69	1,56
H 325	4	0,07	1,15	0,79	1,09

Tabla nº 34: Análisis de peciolos. Año 2008

Muestra	Muestreo	Fe($mg \cdot kg^{-1}$) P	Mn($mg \cdot kg^{-1}$) P	Zn($mg \cdot kg^{-1}$) P	Cu($mg \cdot kg^{-1}$) P	B($mg \cdot kg^{-1}$) P
J 50	3	35,10	341,60	19,60	4,70	5,00
J 65	3	30,10	212,20	22,10	5,00	5,00
CM 15	3	25,50	352,30	24,60	3,50	3,80
CM 25	3	28,00	408,00	27,60	4,70	6,00
CM 90	3	33,20	432,70	20,50	4,20	9,00
H 10	3	33,10	322,80	20,90	3,40	5,00
H 240	3	34,90	55,30	30,20	3,20	7,80
H 325	3	75,80	53,30	40,50	5,20	4,80
J 50	4	32,40	488,40	27,40	1,60	26,20
J 65	4	41,10	142,10	23,60	2,50	31,00
CM 15	4	26,50	482,50	27,20	2,60	25,50
CM 25	4	24,10	361,60	33,00	8,00	20,00
CM 90	4	32,30	524,90	25,10	4,00	28,00
H 10	4	25,00	438,10	48,50	3,20	15,00
H 240	4	27,90	115,20	39,70	2,50	16,60
H 325	4	42,50	98,10	41,40	4,10	8,30

Tabla nº 35: Análisis de peciolos. Año 2008 (Continuación)

Muestra	Muestreo	P(%) P	Ca(%) P	Mg(%) P	K(%) P
J 50	5	0,18	0,65	0,39	2,28
J 65	5	0,31	0,65	0,38	1,92
CM 15	5	0,08	0,72	0,36	1,90
CM 25	5	0,20	0,55	0,51	3,16
CM 90	5	0,03	0,92	0,36	1,87
H 10	5	0,24	0,80	0,38	1,55
H 240	5	0,25	0,83	0,58	2,43
H 325	5	0,19	0,67	0,48	2,25
J 50	6	0,19	1,04	0,56	2,94
J 65	6	0,19	1,27	0,63	1,99
CM 15	6	0,06	0,97	0,45	0,97
CM 25	6	0,14	0,80	0,40	3,09
CM 90	6	0,22	0,80	0,38	3,24
H 10	6	0,26	0,98	0,59	2,06
H 240	6	0,19	0,96	0,54	2,59
H 325	6	0,18	0,99	0,59	2,45

Tabla nº 36: Análisis de peciolos. Año 2009

Muestra	Muestreo	Fe($mg \cdot kg^{-1}$) P	Mn($mg \cdot kg^{-1}$) P	Zn($mg \cdot kg^{-1}$) P	Cu($mg \cdot kg^{-1}$) P	B($mg \cdot kg^{-1}$) P
J 50	5	36,86	358,68	20,58	4,94	11,20
J 65	5	31,61	222,81	23,21	5,25	5,25
CM 15	5	22,20	181,90	25,50	3,20	12,40
CM 25	5	29,96	436,56	29,53	5,03	14,42
CM 90	5	35,52	462,99	21,94	4,49	9,63
H 10	5	24,10	243,70	31,10	4,30	18,20
H 240	5	28,00	168,50	35,90	2,50	15,80
H 325	5	22,10	109,30	22,80	3,10	10,50
J 50	6	44,30	394,20	36,50	2,20	22,80
J 65	6	56,00	226,00	38,10	3,30	36,20
CM 15	6	33,40	252,60	25,90	1,60	12,60
CM 25	6	58,70	426,10	31,70	7,30	50,80
CM 90	6	34,60	341,30	29,30	2,60	25,80
H 10	6	40,60	421,80	39,10	3,50	11,20
H 240	6	37,30	98,70	53,40	2,90	20,60
H 325	6	60,70	112,20	42,80	3,10	14,20

Tabla nº 37: Análisis de peciolos. Año 2009 (Continuación)

ANEXO IV

Resultados de los análisis de sarmientos

ANEXO IV. ANÁLISIS DE SARMIENTOS

Muestra	Muestreo	P(%) B	Ca(%) B	Mg(%) B	K(%) B	Fe($mg \cdot kg^{-1}$) B	Mn($mg \cdot kg^{-1}$) B	Zn($mg \cdot kg^{-1}$) B	Cu($mg \cdot kg^{-1}$) B	B($mg \cdot kg^{-1}$) B
J 50	1	0,11	0,33	0,08	0,73	15,50	51,10	11,30	6,10	15,00
J 65	1	0,06	0,16	0,08	0,62	16,20	29,50	12,10	6,80	26,70
CM 15	1	0,08	0,18	0,10	0,74	17,40	66,20	13,30	5,10	5,10
CM 25	1	0,02	0,20	0,09	0,91	16,30	78,40	12,90	6,60	2,60
CM 90	1	0,07	0,32	0,08	0,78	15,10	47,50	1,80	4,80	2,20
H 10	1	0,09	0,37	0,10	0,67	22,70	41,70	9,30	5,20	6,40
H 240	1	0,01	0,29	0,12	0,69	55,80	40,80	12,10	8,70	51,70
H 325	1	0,01	0,17	0,11	0,71	18,90	33,60	8,80	4,10	0,80
J 50	2	0,05	0,38	0,08	0,55	17,40	24,80	8,20	3,20	7,80
J 65	2	0,00	0,04	0,10	0,71	17,80	28,10	14,00	5,90	1,60
CM 15	2	0,07	0,25	0,11	0,61	27,60	45,80	11,20	5,00	33,50
CM 25	2	0,01	0,03	0,10	0,66	20,60	29,80	11,30	4,70	1,20
CM 90	2	0,08	0,21	0,07	0,79	24,50	48,30	13,90	4,40	9,50
H 10	2	0,07	0,37	0,09	0,60	16,90	21,50	8,10	3,30	11,50
H 240	2	0,07	0,20	0,10	0,52	14,70	9,00	4,90	3,80	9,20
H 325	2	0,00	0,10	0,04	0,56	12,50	8,80	7,30	3,00	1,60
J 50	3	0,06	0,19	0,12	0,76	20,60	39,80	5,90	7,50	4,30
J 65	3	0,06	0,46	0,12	0,48	12,60	24,20	5,50	5,60	6,20
CM 15	3	0,03	0,55	0,12	0,65	21,00	23,50	5,00	3,80	6,10
CM 25	3	0,05	0,68	0,11	0,82	26,70	34,00	16,20	4,50	9,80
CM 90	3	0,06	0,72	0,12	0,79	13,50	50,80	12,50	4,20	8,60
H 10	3	0,06	0,58	0,11	0,64	18,50	28,70	3,20	3,20	8,80
H 240	3	0,07	0,42	0,15	0,65	90,30	37,70	19,60	17,60	28,70
H 325	3	0,06	0,24	0,16	0,85	32,60	9,20	25,20	6,10	4,90

Tabla nº 38: Análisis de sarmientos. Zona Basal. Año 2007-08-09

Muestra	Muestreo	P(%) M	Ca(%) M	Mg(%) M	K(%) M	Fe($mg \cdot kg^{-1}$) M	Mn($mg \cdot kg^{-1}$) M	Zn($mg \cdot kg^{-1}$) M	Cu($mg \cdot kg^{-1}$) M	B($mg \cdot kg^{-1}$) M
J 50	1	0,08	0,11	0,09	0,72	21,10	52,80	14,00	5,70	28,80
J 65	1	0,07	0,38	0,08	0,63	11,80	30,00	9,80	4,90	26,70
CM 15	1	0,05	0,11	0,09	0,83	11,10	63,10	10,70	4,30	4,40
CM 25	1	0,09	0,30	0,07	0,84	16,90	61,20	31,00	4,70	9,70
CM 90	1	0,08	0,33	0,08	0,71	26,50	47,50	19,50	3,80	17,00
H 10	1	0,09	0,35	0,09	0,69	18,20	34,80	11,20	3,90	1,00
H 240	1	0,08	0,26	0,10	0,60	18,40	29,70	9,90	5,70	30,90
H 325	1	0,13	0,23	0,09	0,68	13,70	30,60	9,20	3,80	6,50
J 50	2	0,03	0,37	0,09	0,63	22,90	24,00	24,90	4,30	10,70
J 65	2	0,01	0,02	0,11	0,72	19,20	26,30	14,10	4,80	0,80
CM 15	2	0,06	0,19	0,11	0,63	38,70	36,40	10,50	3,70	18,60
CM 25	2	0,01	0,03	0,11	0,69	19,90	28,90	39,00	3,50	2,80
CM 90	2	0,01	0,12	0,06	0,87	14,70	38,70	10,20	4,50	3,10
H 10	2	0,06	0,34	0,08	0,54	14,20	20,00	11,60	2,90	19,50
H 240	2	0,04	0,17	0,11	0,60	20,60	8,70	15,40	3,80	8,40
H 325	2	0,08	0,20	0,09	0,56	21,10	13,00	7,20	3,20	10,30
J 50	3	0,02	0,10	0,10	0,77	20,20	27,40	11,80	4,00	3,90
J 65	3	0,05	0,44	0,12	0,57	6,20	21,00	13,10	5,20	13,70
CM 15	3	0,03	0,42	0,12	0,51	4,70	19,60	1,20	4,10	11,70
CM 25	3	0,06	0,35	0,10	0,61	4,50	27,50	1,90	4,50	8,30
CM 90	3	0,04	0,68	0,12	0,80	11,40	52,40	19,80	4,00	14,40
H 10	3	0,05	0,58	0,10	0,71	18,80	27,20	9,60	2,80	16,10
H 240	3	0,05	0,40	0,15	0,59	20,40	27,80	2,50	8,80	17,60
H 325	3	0,06	0,51	0,15	0,79	24,70	9,50	9,00	4,10	31,80

Tabla nº 39: Análisis de sarmientos. Zona Media. Año 2007-08-09

Muestra	Muestreo	P(%) D	Ca(%) D	Mg(%) D	K(%) D	Fe($mg \cdot kg^{-1}$) D	Mn($mg \cdot kg^{-1}$) D	Zn($mg \cdot kg^{-1}$) D	Cu($mg \cdot kg^{-1}$) D	B($mg \cdot kg^{-1}$) D
J 50	1	0,09	0,17	0,10	0,89	25,30	54,60	7,60	4,40	13,70
J 65	1	0,08	0,43	0,09	0,68	13,90	26,20	12,90	4,20	11,00
CM 15	1	0,03	0,14	0,11	0,82	34,70	51,60	8,50	3,80	3,90
CM 25	1	0,08	0,27	0,07	0,95	75,10	61,70	19,30	5,00	6,20
CM 90	1	0,07	0,38	0,10	0,81	22,60	62,60	11,60	4,00	21,20
H 10	1	0,10	0,36	0,09	0,72	36,40	37,60	14,40	4,00	8,10
H 240	1	0,08	0,35	0,11	0,64	41,60	29,00	11,80	5,30	31,10
H 325	1	0,07	0,16	0,12	0,76	14,30	34,20	12,90	3,90	3,60
J 50	2	0,05	0,38	0,09	0,69	20,30	28,50	9,70	2,90	10,50
J 65	2	0,01	0,05	0,12	0,76	19,20	31,20	19,50	4,30	1,80
CM 15	2	0,04	0,18	0,11	0,74	36,40	43,20	11,70	3,50	12,70
CM 25	2	0,11	0,16	0,09	0,71	17,90	37,00	18,70	3,30	4,40
CM 90	2	0,08	0,22	0,08	0,96	24,60	64,10	23,50	4,90	6,10
H 10	2	0,09	0,35	0,09	0,63	21,30	20,30	17,90	3,10	19,90
H 240	2	0,00	0,04	0,08	0,56	14,90	15,50	14,30	3,20	2,80
H 325	2	0,01	0,08	0,09	0,61	14,60	11,50	12,80	3,10	1,50
J 50	3	0,08	0,46	0,11	0,79	26,30	38,50	14,40	3,50	13,40
J 65	3	0,08	0,49	0,12	0,60	14,60	28,20	9,70	5,20	5,10
CM 15	3	0,03	0,67	0,14	0,70	25,10	23,40	14,60	1,20	10,70
CM 25	3	0,09	0,53	0,13	0,93	22,80	38,10	14,80	4,10	13,20
CM 90	3	0,08	0,78	0,12	0,99	15,00	72,00	18,20	4,00	13,00
H 10	3	0,07	0,37	0,11	0,77	15,10	29,10	19,80	3,00	5,70
H 240	3	0,05	0,37	0,14	0,56	10,30	20,30	6,20	8,10	17,40
H 325	3	0,08	0,74	0,15	0,96	32,90	14,10	29,00	4,20	7,50

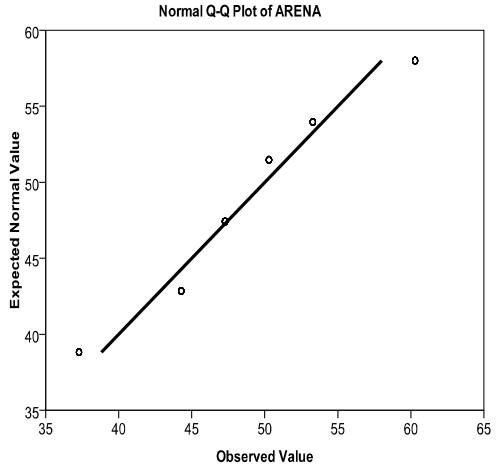
Tabla nº 40: Análisis de sarmientos. Zona Distal. Año 2007-08-09

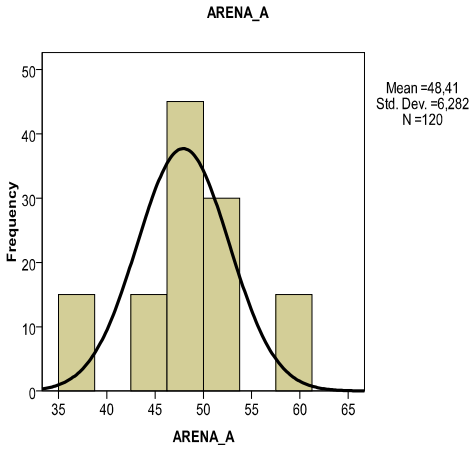
ANEXO V

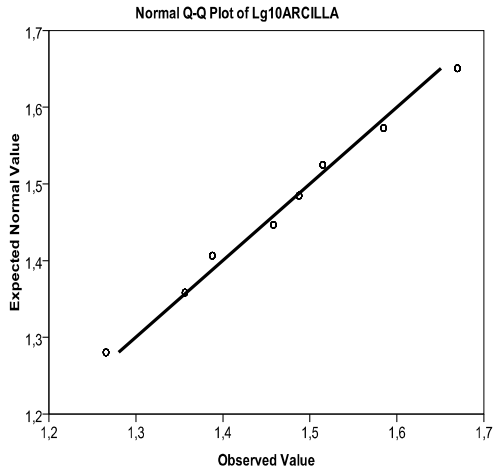
Gráficos de contraste de presunción de normalidad

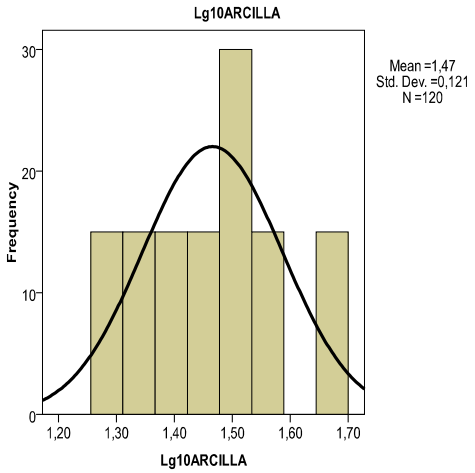
ANEXO V. GRÁFICOS DE CONTRASTE DE NORMALIDAD.

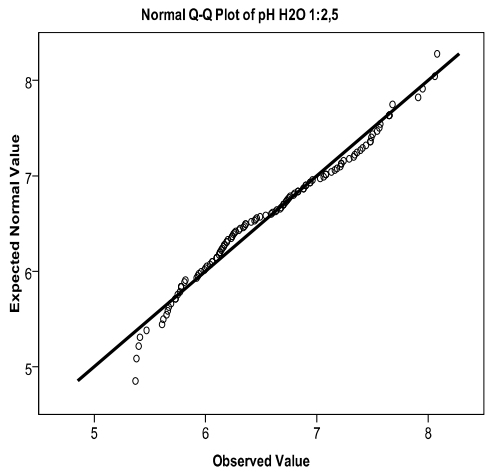
Gráficos Cuantil-Cuantil e Histogramas: “Parámetros Edáficos”

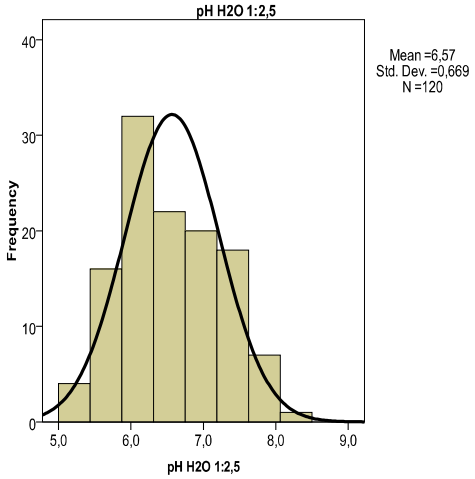


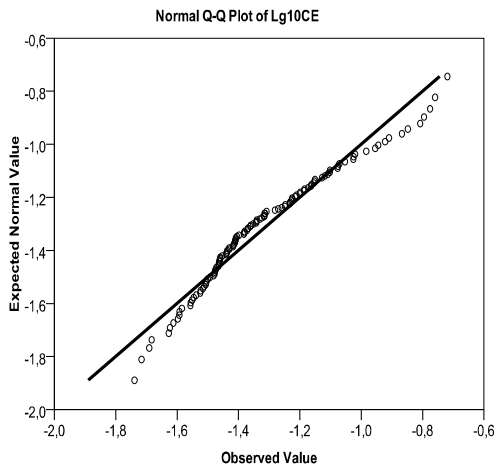


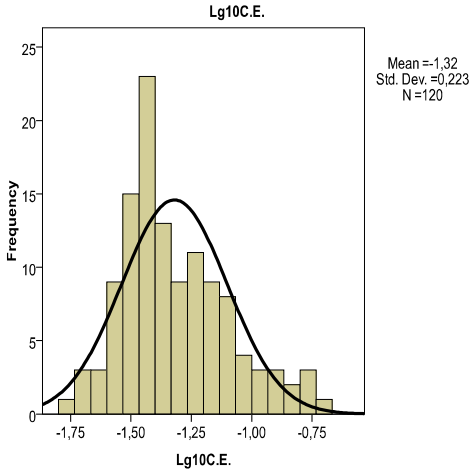


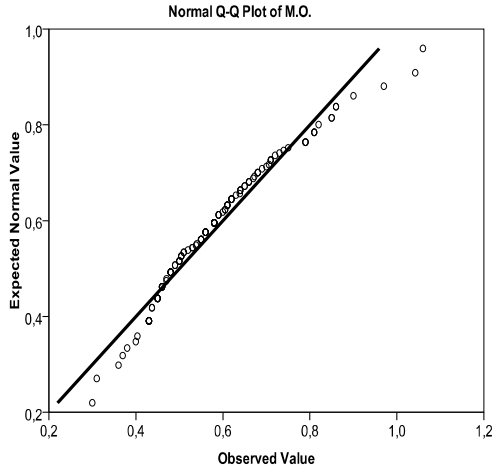


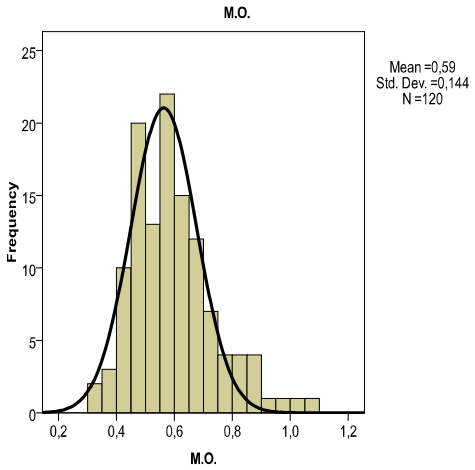


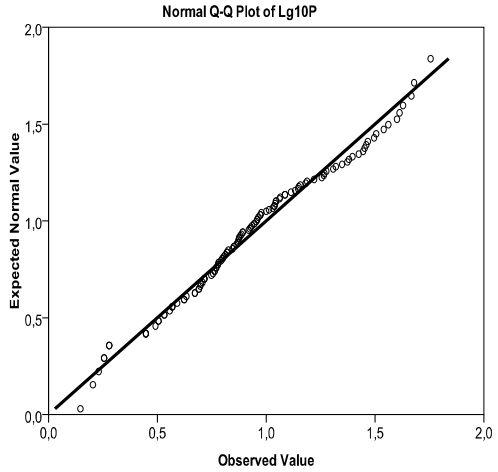


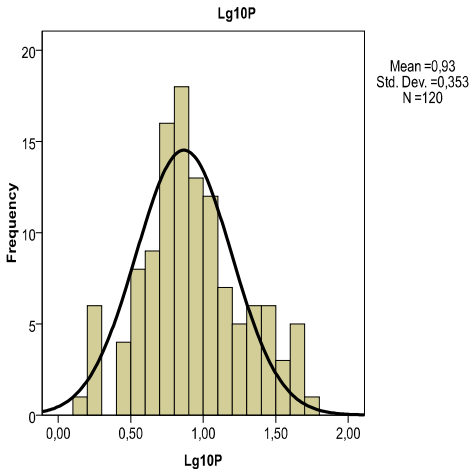

Normal Q-Q Plot of Lg10CE
Expected Normal Value
Observed Value
-0,6
-0,8
-1,0
-1,2
-1,4
-1,6
-1,8
-2,0
-2,0
-1,8
-1,6
-1,4
-1,2
-1,0
-0,8
-0,6

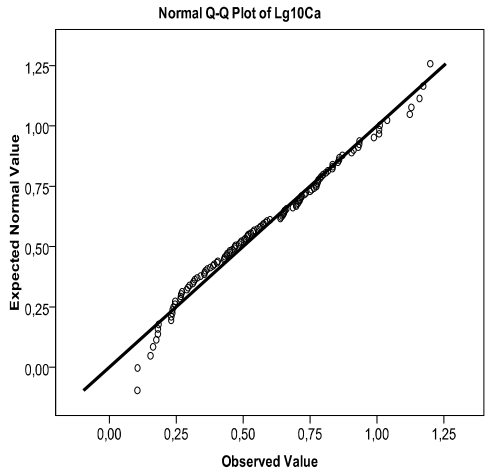

Lg10C.E.
Mean =-1,32
Std. Dev. =0,223
N =120
Frequency
Lg10C.E.
25
20
15
10
5
0
-1,75
-1,50
-1,25
-1,00
-0,75

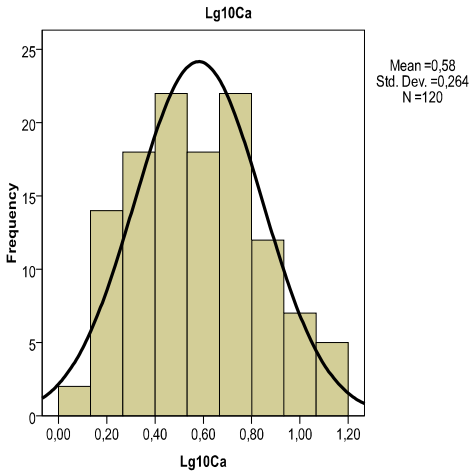

Normal Q-Q Plot of M.O.
Expected Normal Value
Observed Value
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2

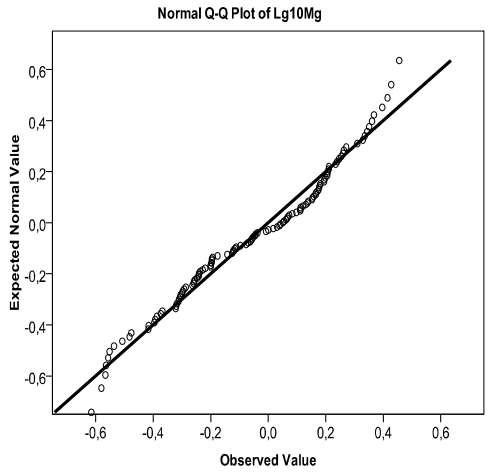

M.O.
Mean =0,59
Std. Dev. =0,144
N =120
Frequency
M.O.
25
20
15
10
5
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2

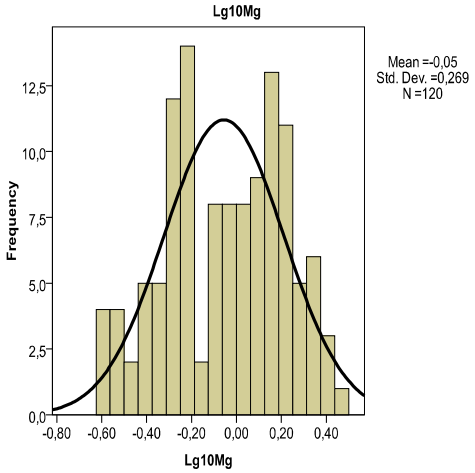

Normal Q-Q Plot of Lg10P
Expected Normal Value
Observed Value
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
0,0
0,5
1,0
1,5
2,0

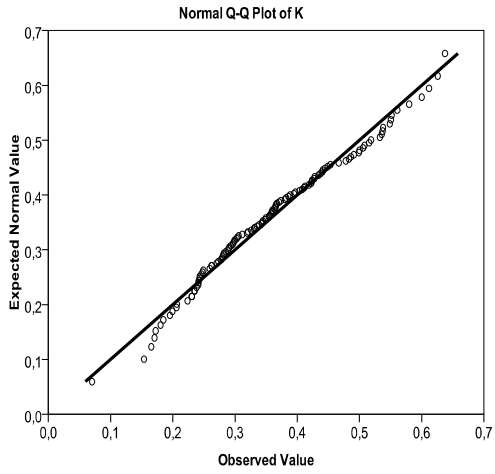

Lg10P
Mean =0,93
Std. Dev. =0,353
N =120
Frequency
Lg10P
20
15
10
5
0
0,00
0,50
1,00
1,50
2,00

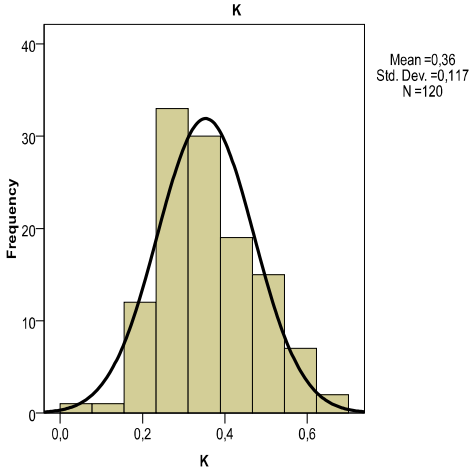

Normal Q-Q Plot of Lg10Ca
Expected Normal Value
Observed Value
0,00
0,25
0,50
0,75
1,00
1,25

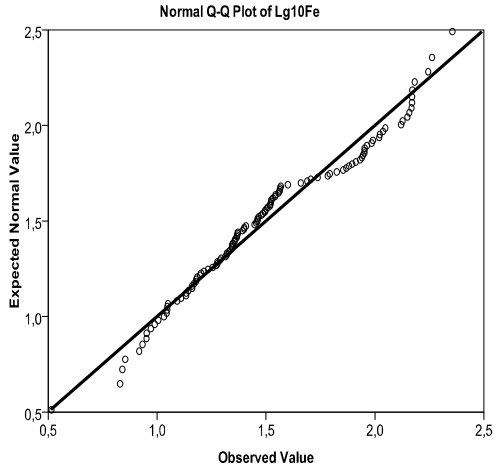

Lg10Ca
Frequency
Mean =0,58
Std. Dev. =0,264
N =120
Lg10Ca

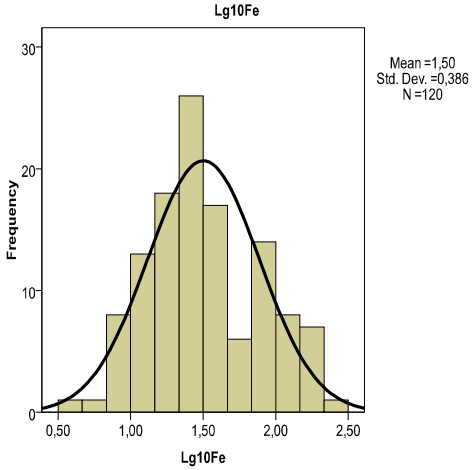

Normal Q-Q Plot of Lg10Mg
Expected Normal Value
Observed Value
-0,6
-0,4
-0,2
0,0
0,2
0,4
0,6

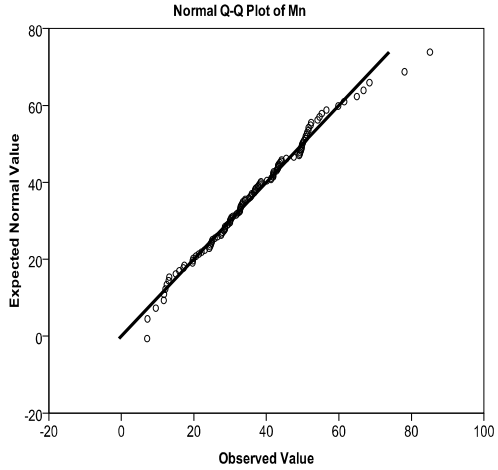

Lg10Mg
Frequency
Mean =-0,05
Std. Dev. =0,269
N =120
Lg10Mg

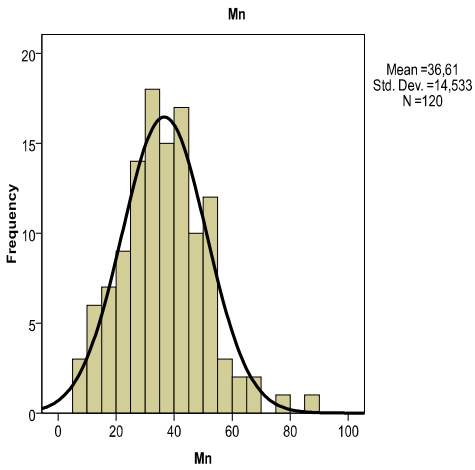

Normal Q-Q Plot of K
Expected Normal Value
Observed Value
0,0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7

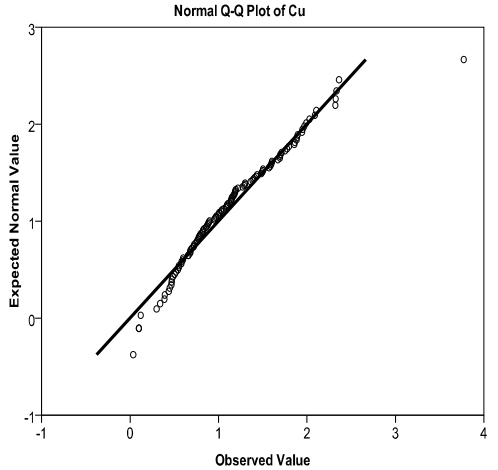

K
Frequency
Mean =0,36
Std. Dev. =0,117
N =120
K

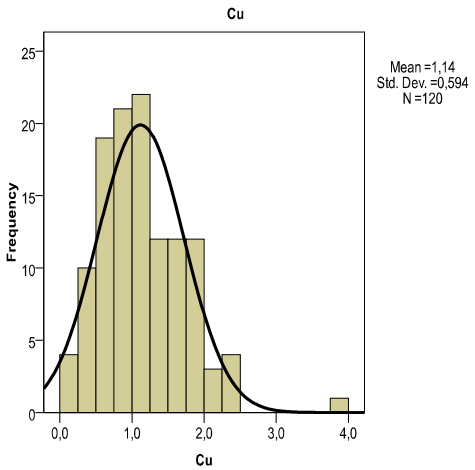

Normal Q-Q Plot of Lg10Fe
Expected Normal Value
Observed Value
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,5
1,0
1,5
2,0
2,5

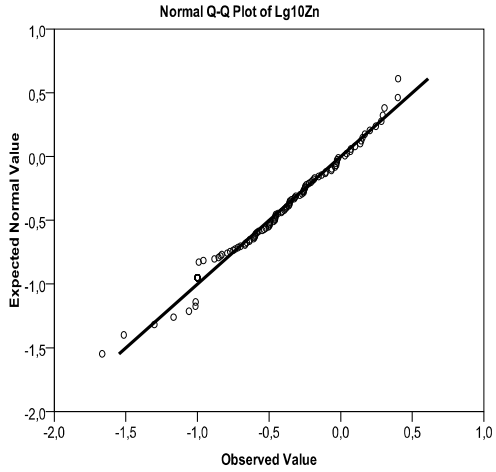

Lg10Fe
Mean =1,50
Std. Dev. =0,386
N =120
Frequency
Lg10Fe
30
20
10
0
0,50
1,00
1,50
2,00
2,50

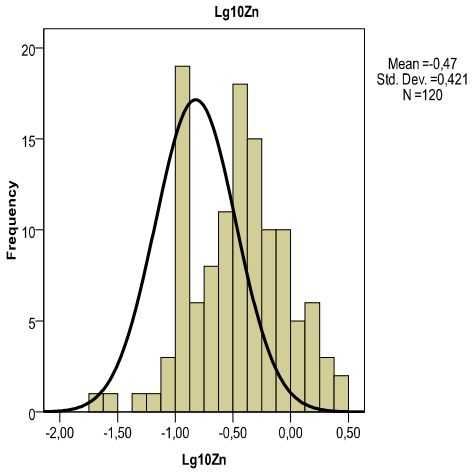

Normal Q-Q Plot of Mn
Expected Normal Value
Observed Value
80
60
40
20
0
-20
-20
0
20
40
60
80
100

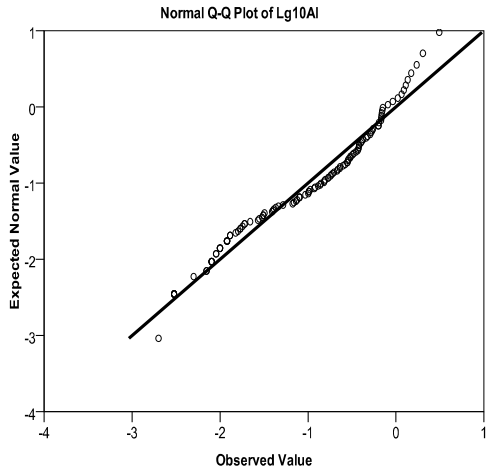

Mn
Mean =36,61
Std. Dev. =14,533
N =120
Frequency
Mn
20
15
10
5
0
0
20
40
60
80
100

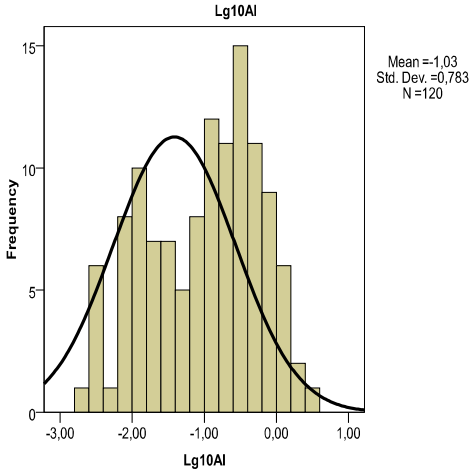

Normal Q-Q Plot of Cu
Expected Normal Value
Observed Value
3
2
1
0
-1
-1
0
1
2
3
4


Cu
Mean =1,14
Std. Dev. =0,594
N =120
Frequency
Cu
25
20
15
10
5
0
0,0
1,0
2,0
3,0
4,0

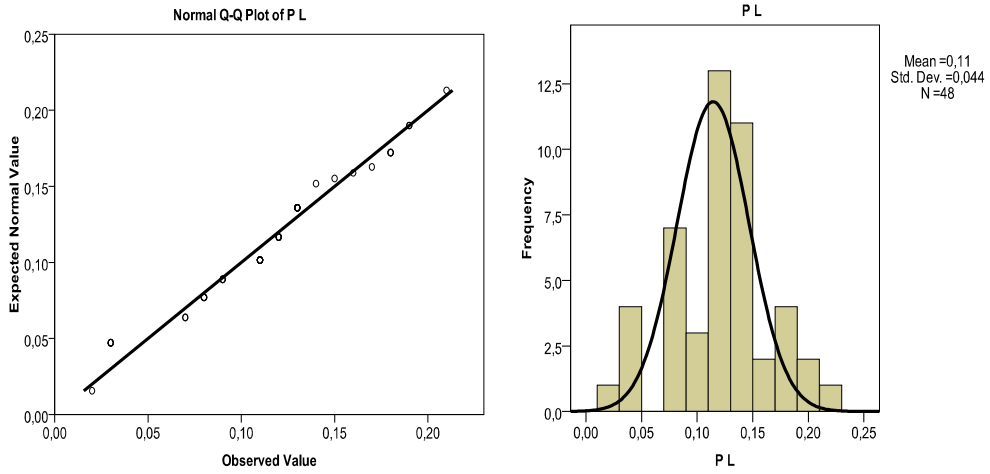

Normal Q-Q Plot of Lg10Zn
Expected Normal Value
Observed Value
1,0
0,5
0,0
-0,5
-1,0
-1,5
-2,0
-2,0
-1,5
-1,0
-0,5
0,0
0,5
1,0

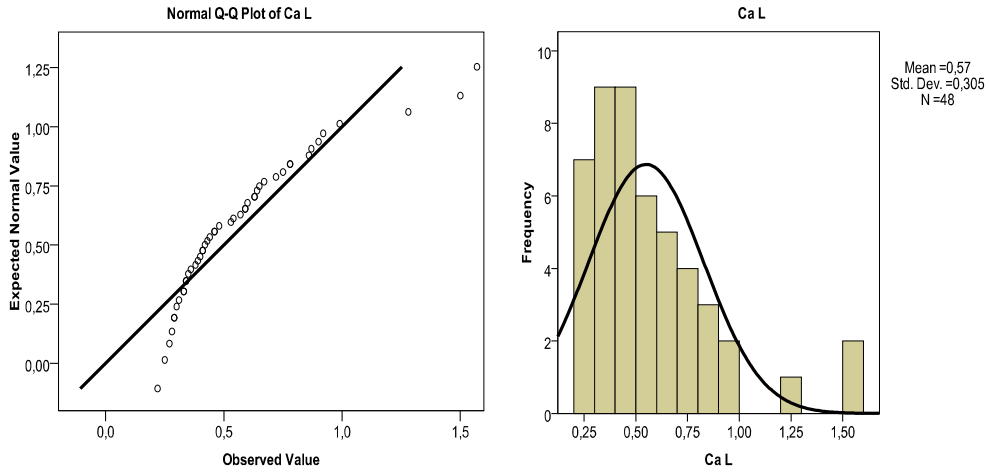

Lg10Zn
Mean =-0,47
Std. Dev. =0,421
N =120
Frequency
Lg10Zn
20
15
10
5
0
-2,00
-1,50
-1,00
-0,50
0,00
0,50

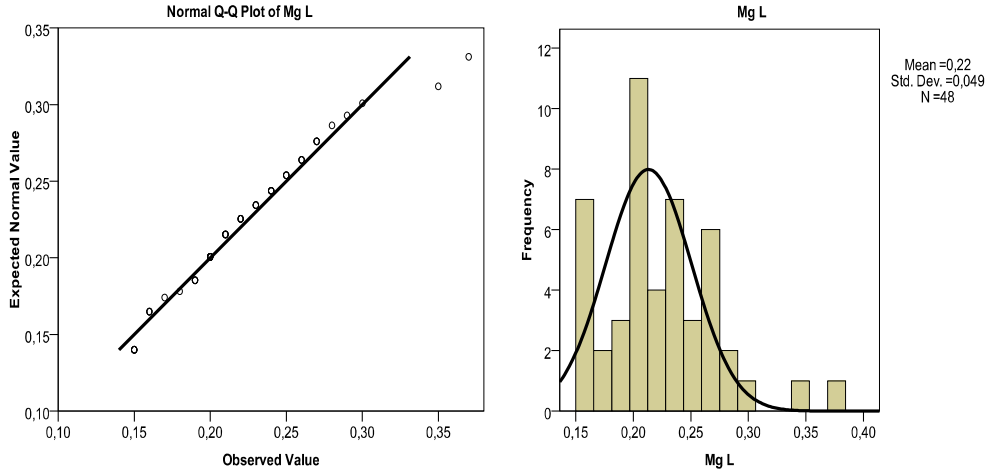

Normal Q-Q Plot of Lg10Al
Expected Normal Value
Observed Value
1
0
-1
-2
-3
-4
-4
-3
-2
-1
0
1

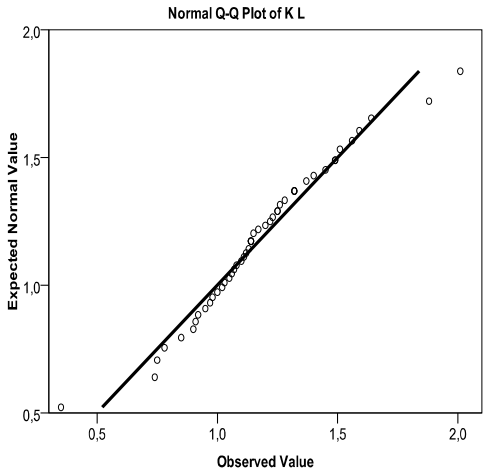

Lg10Al
Mean =-1,03
Std. Dev. =0,783
N =120
Frequency
Lg10Al
15
10
5
0
-3,00
-2,00
-1,00
0,00
1,00

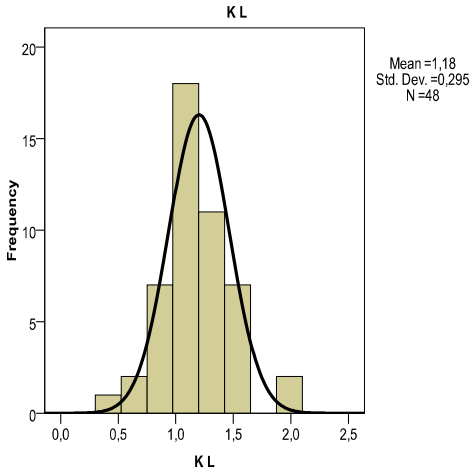
Gráficos Cuantil-Cuantil e Histogramas: “Nutrientes Limbos”

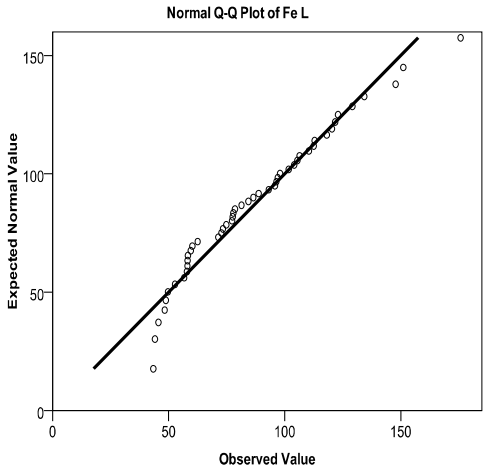


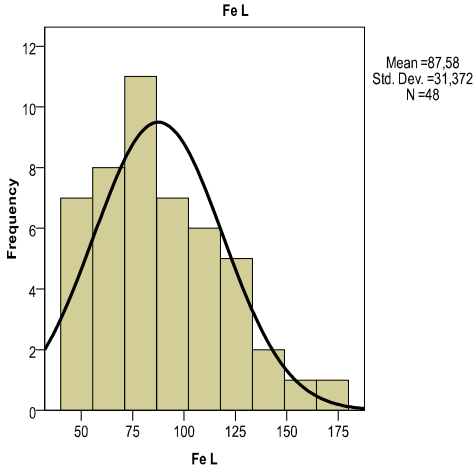


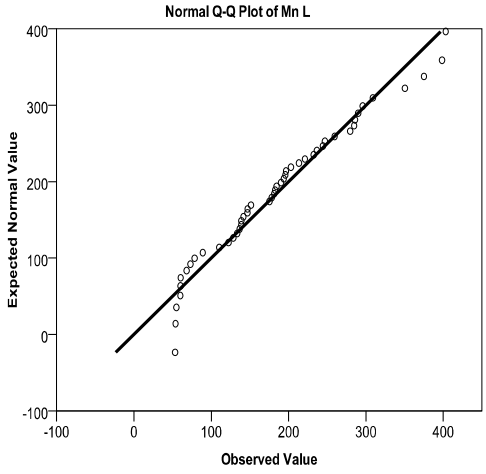


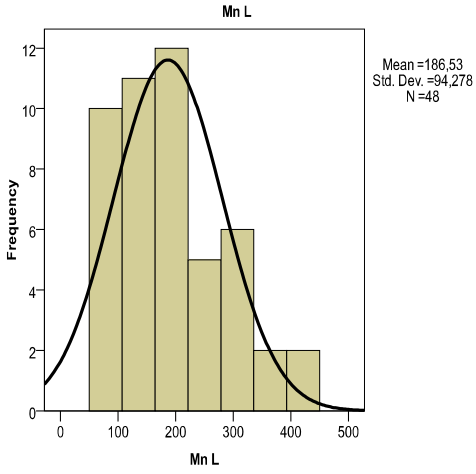

Normal Q-Q Plot of K L
Expected Normal Value
Observed Value
2,0
1,5
1,0
0,5
0,5
1,0
1,5
2,0

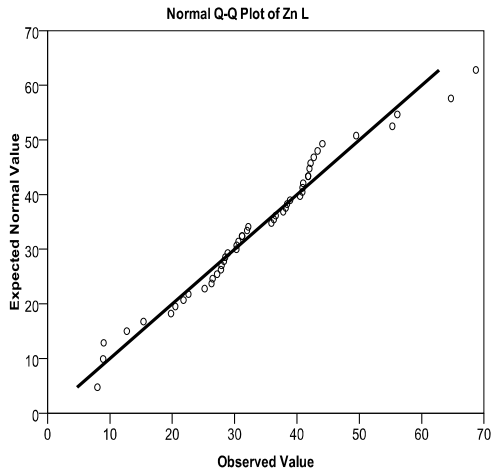

K L
Mean =1,18
Std. Dev. =0,295
N =48
Frequency
K L
20
15
10
5
0
0,0
0,5
1,0
1,5
2,0
2,5

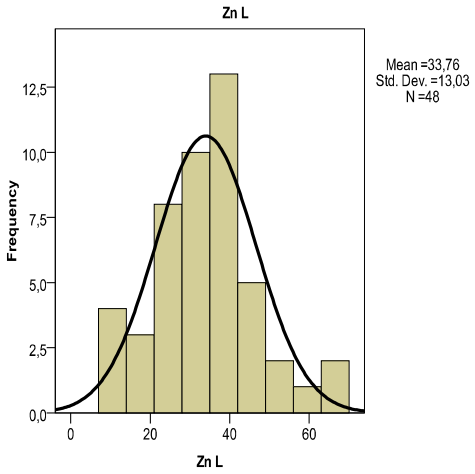

Normal Q-Q Plot of Fe L
Expected Normal Value
Observed Value
150
100
50
0
0
50
100
150

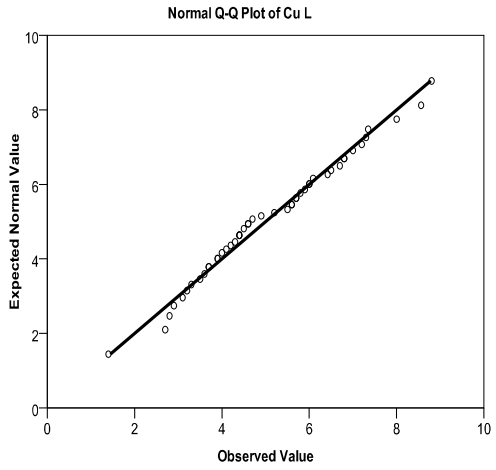

Fe L
Mean =87,58
Std. Dev. =31,372
N =48
Frequency
Fe L
12
10
8
6
4
2
0
50
75
100
125
150
175

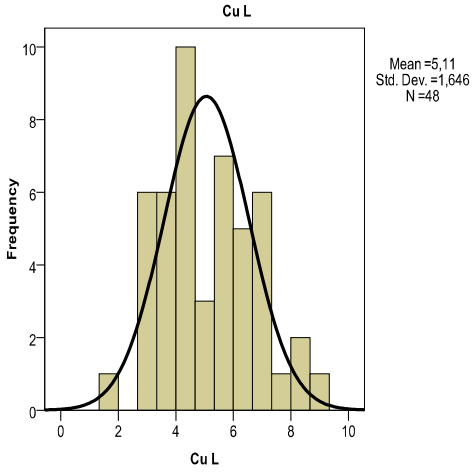

Normal Q-Q Plot of Mn L
Expected Normal Value
Observed Value
400
300
200
100
0
-100
-100
0
100
200
300
400

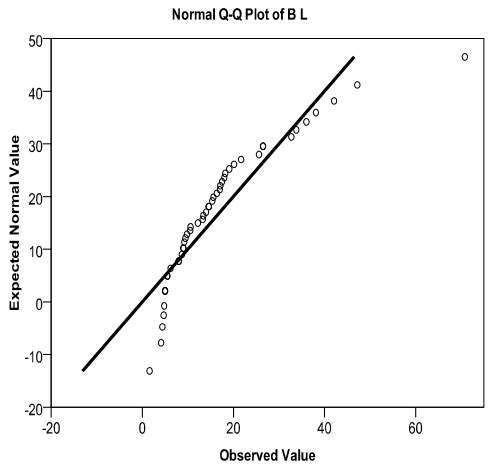

Mn L
Mean =186,53
Std. Dev. =94,278
N =48
Frequency
Mn L
12
10
8
6
4
2
0
0
100
200
300
400
500

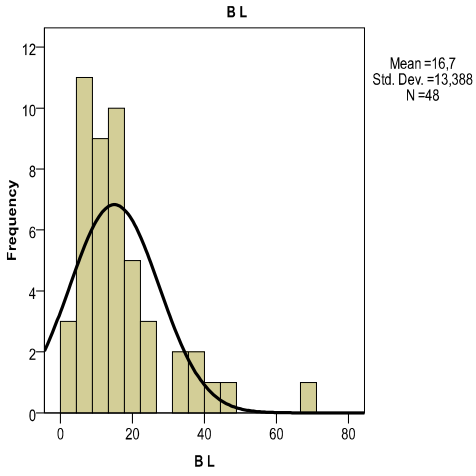

Normal Q-Q Plot of Zn L
Expected Normal Value
Observed Value


Zn L
Mean =33,76
Std. Dev. =13,03
N =48
Frequency
Zn L

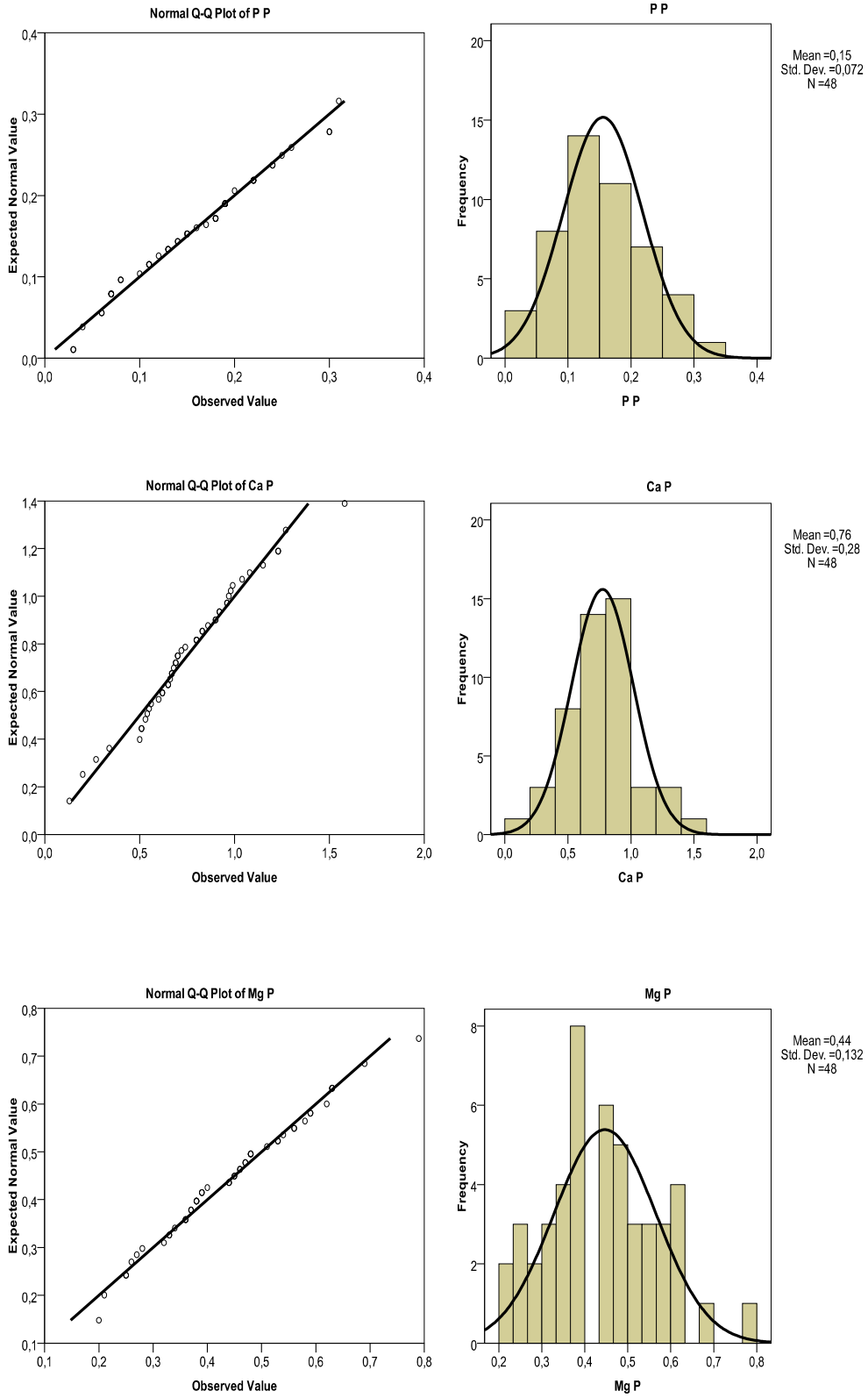

Normal Q-Q Plot of Cu L
Expected Normal Value
Observed Value

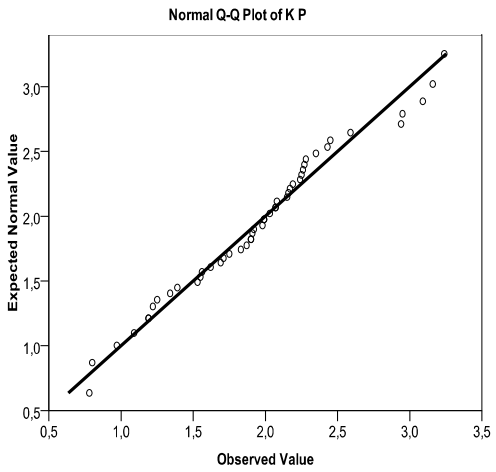

Cu L
Mean =5,11
Std. Dev. =1,646
N =48
Frequency
Cu L

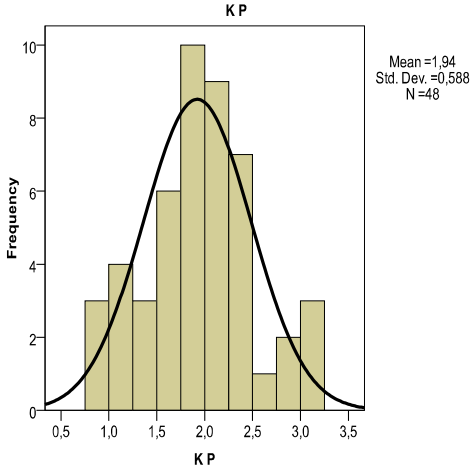

Normal Q-Q Plot of B L
Expected Normal Value
Observed Value

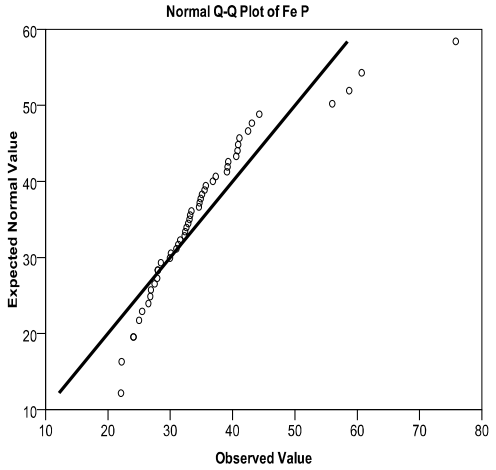

B L
Mean =16,7
Std. Dev. =13,388
N =48
Frequency
B L

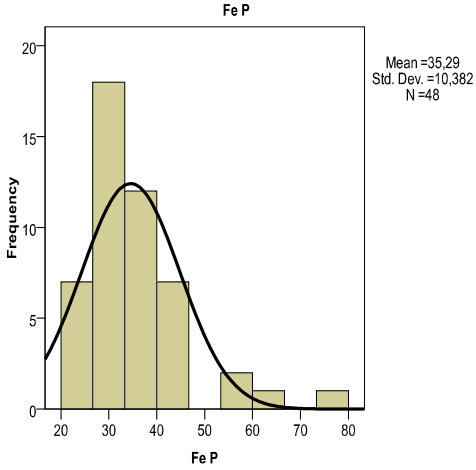
Gráficos Cuantil-Cuantil e Histogramas: “Nutrientes Peciolos”

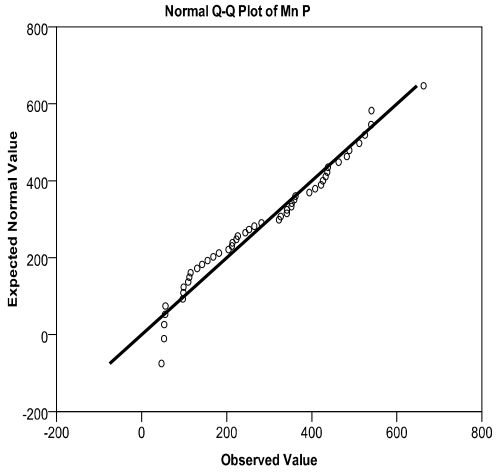


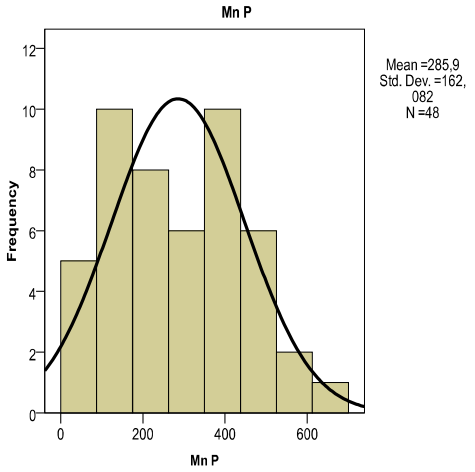

Normal Q-Q Plot of K P
Expected Normal Value
Observed Value
0,5
1,0
1,5
2,0
2,5
3,0
3,5

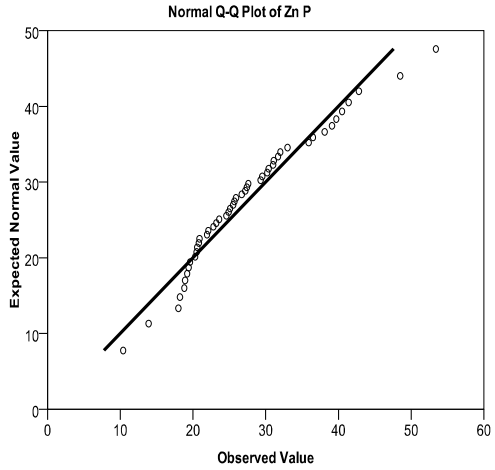

K P
Mean =1,94
Std. Dev. =0,588
N =48
Frequency
K P
0
2
4
6
8
10
0,5
1,0
1,5
2,0
2,5
3,0
3,5

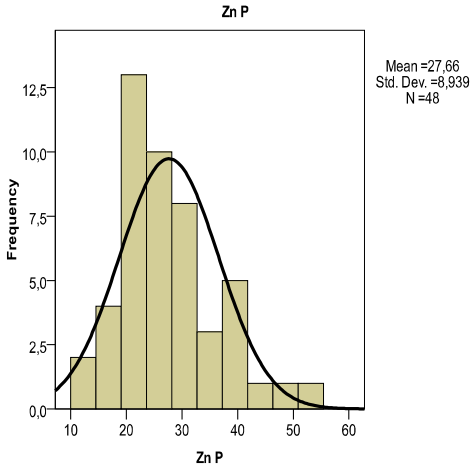

Normal Q-Q Plot of Fe P
Expected Normal Value
Observed Value
10
20
30
40
50
60
70
80

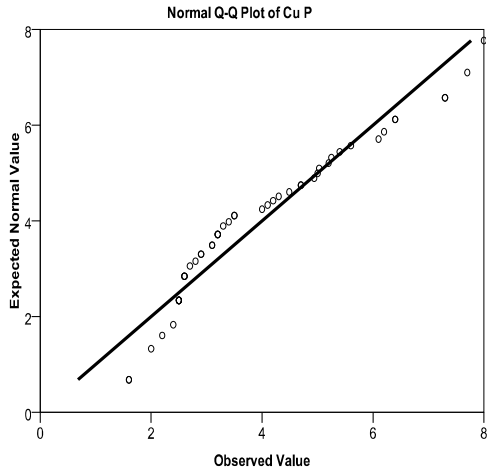

Fe P
Mean =35,29
Std. Dev. =10,382
N =48
Frequency
Fe P
0
5
10
15
20
20
30
40
50
60
70
80

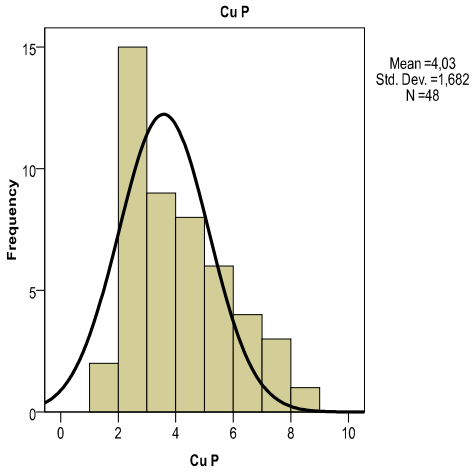

Normal Q-Q Plot of Mn P
Expected Normal Value
Observed Value
-200
0
200
400
600
800

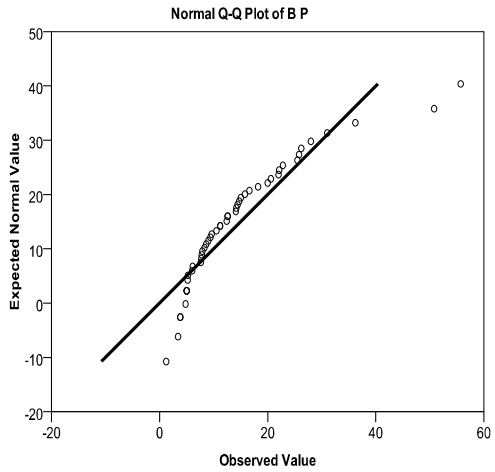

Mn P
Mean =285,9
Std. Dev. =162,
082
N =48
Frequency
Mn P
0
2
4
6
8
10
12
0
200
400
600

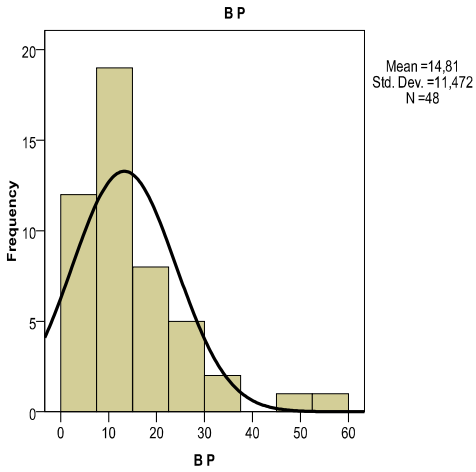

Normal Q-Q Plot of Zn P
Expected Normal Value
Observed Value


Zn P
Mean =27,66
Std. Dev. =8,939
N =48
Frequency
Zn P

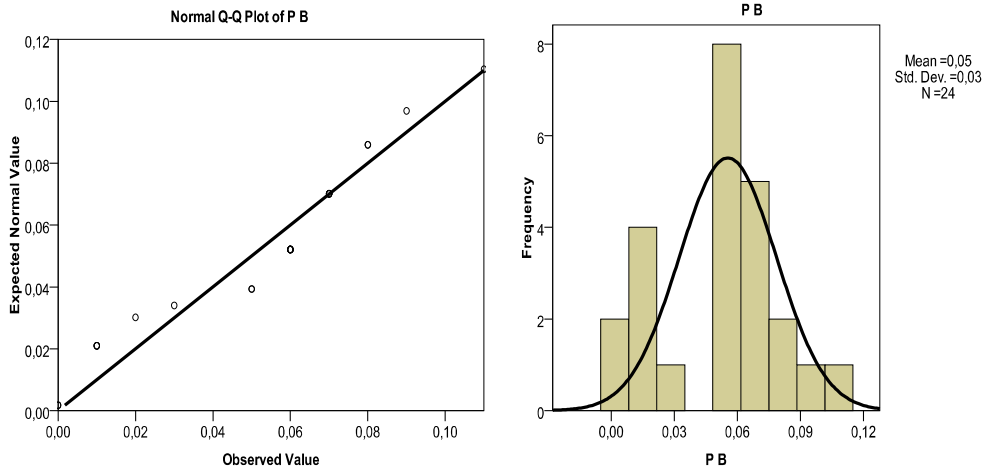

Normal Q-Q Plot of Cu P
Expected Normal Value
Observed Value

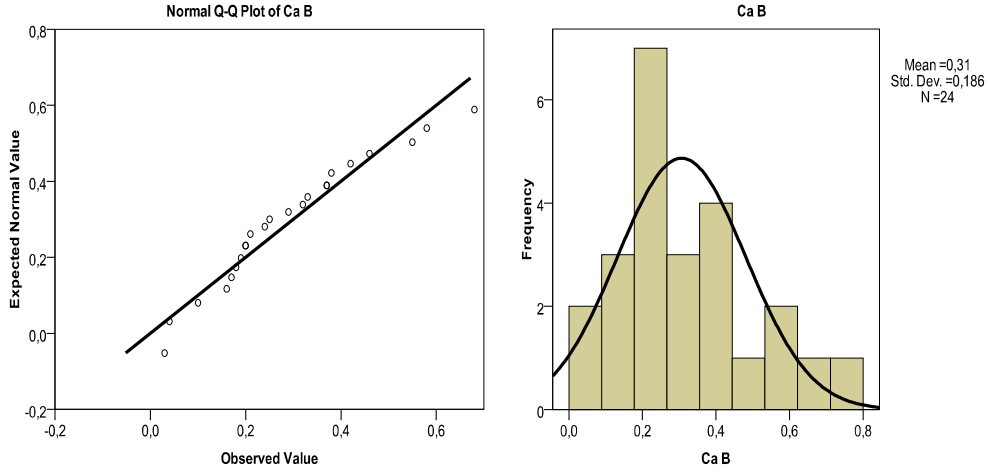

Cu P
Mean =4,03
Std. Dev. =1,682
N =48
Frequency
Cu P

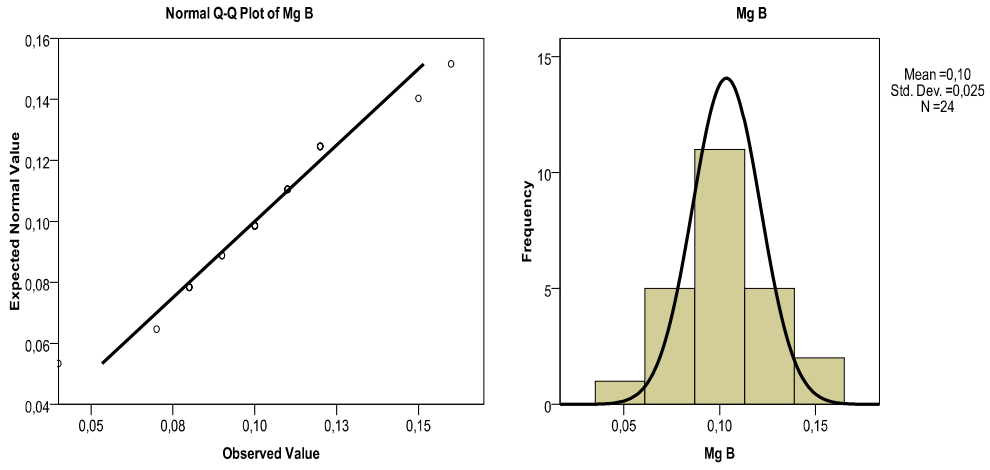

Normal Q-Q Plot of B P
Expected Normal Value
Observed Value

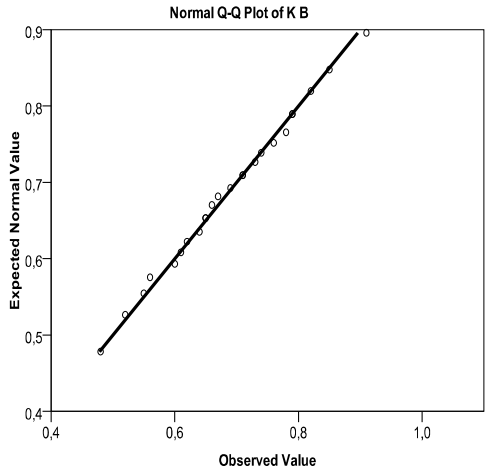

B P
Mean =14,81
Std. Dev. =11,472
N =48
Frequency
B P

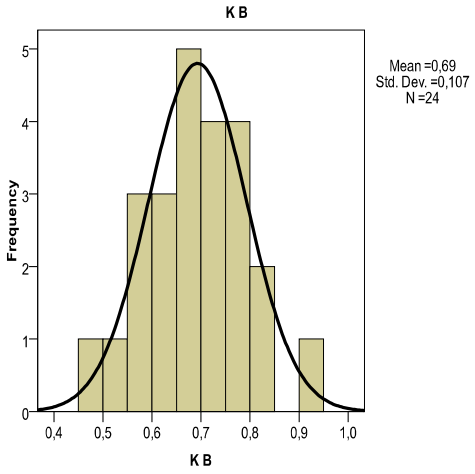
Gráficos Cuantil-Cuantil e Histogramas: “Nutrientes Sarmientos Zona Basal”

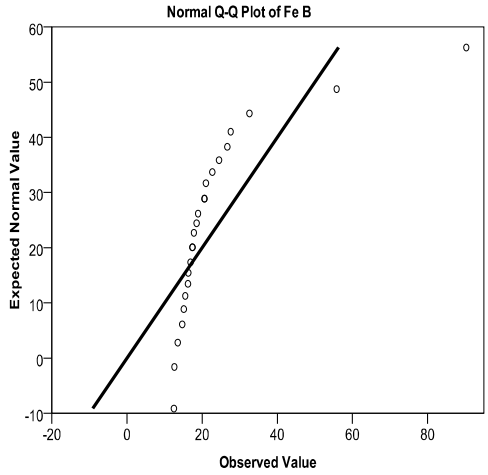


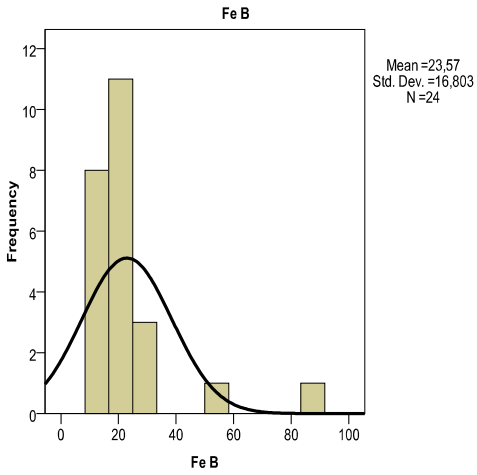


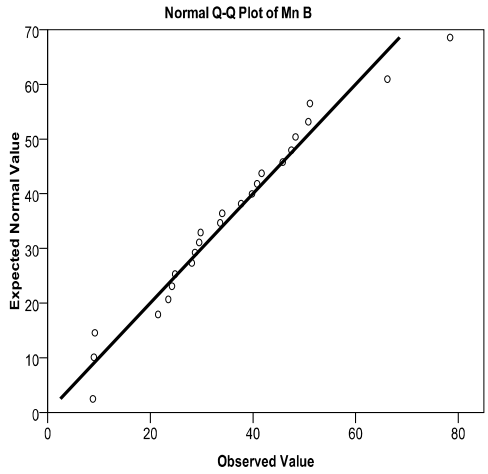


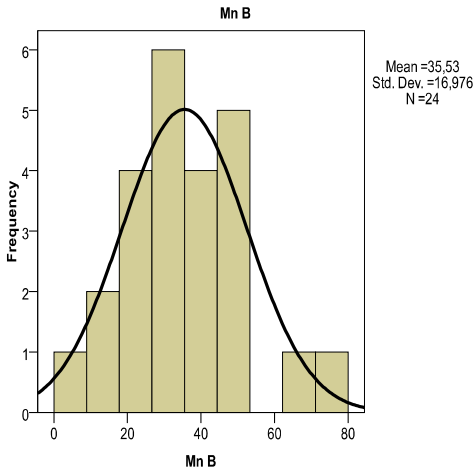

Normal Q-Q Plot of K B
Expected Normal Value
Observed Value
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0

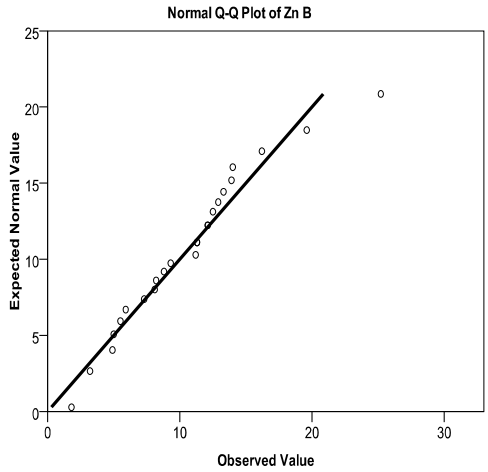

K B
Mean =0,69
Std. Dev. =0,107
N =24
Frequency
K B

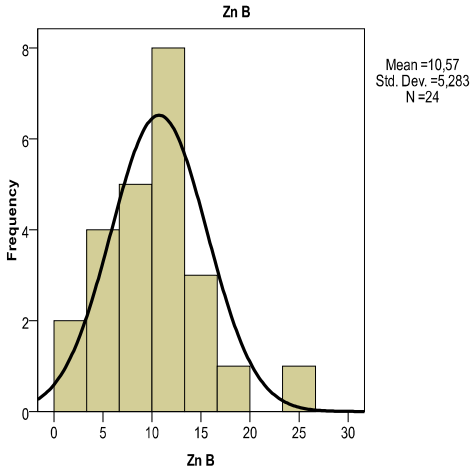

Normal Q-Q Plot of Fe B
Expected Normal Value
Observed Value
-20
0
20
40
60
80

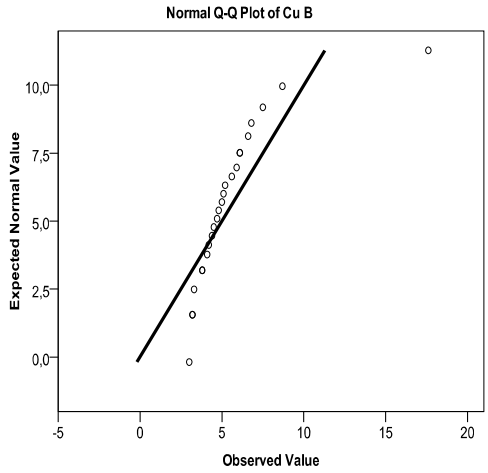

Fe B
Mean =23,57
Std. Dev. =16,803
N =24
Frequency
Fe B

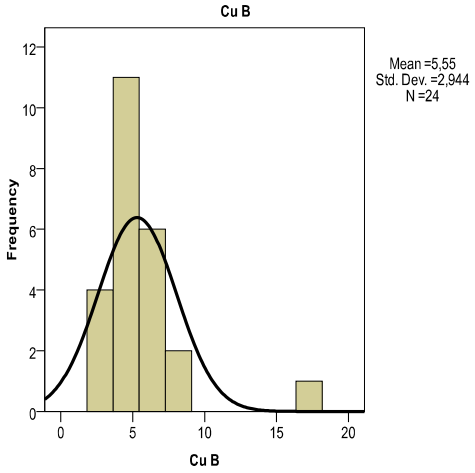

Normal Q-Q Plot of Mn B
Expected Normal Value
Observed Value
0
20
40
60
80

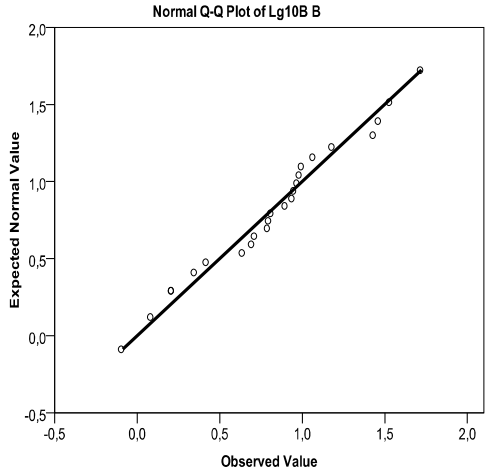

Mn B
Mean =35,53
Std. Dev. =16,976
N =24
Frequency
Mn B

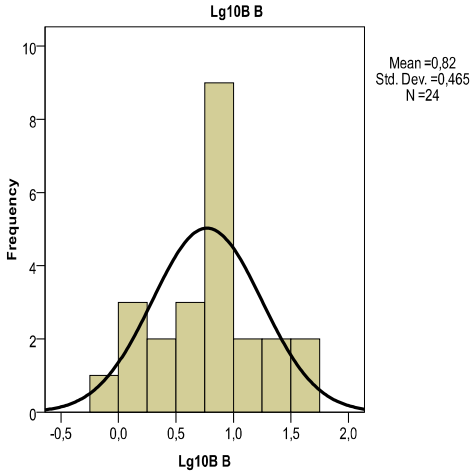

Normal Q-Q Plot of Zn B
Expected Normal Value
Observed Value
0
5
10
15
20
25
30


Zn B
Frequency
Zn B
Mean =10,57
Std. Dev. =5,283
N =24
0
2
4
6
8
0
5
10
15
20
25
30

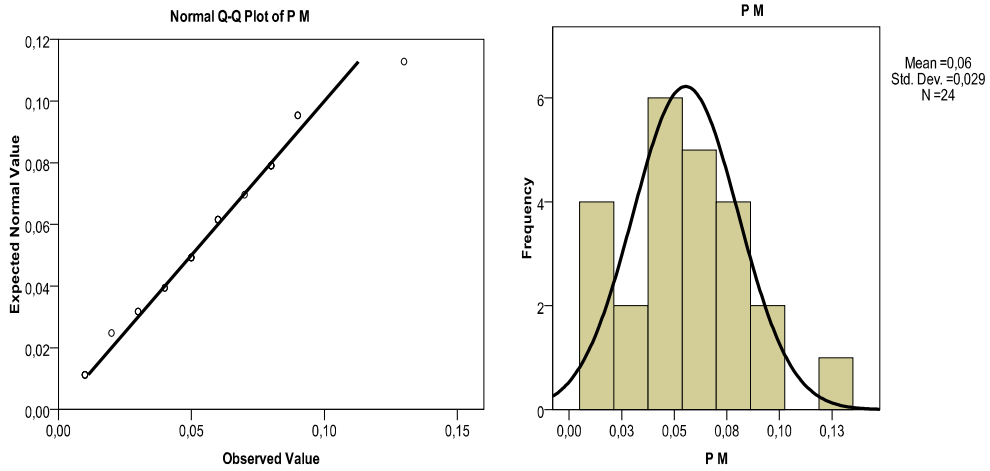

Normal Q-Q Plot of Cu B
Expected Normal Value
Observed Value
0,0
2,5
5,0
7,5
10,0
-5
0
5
10
15
20

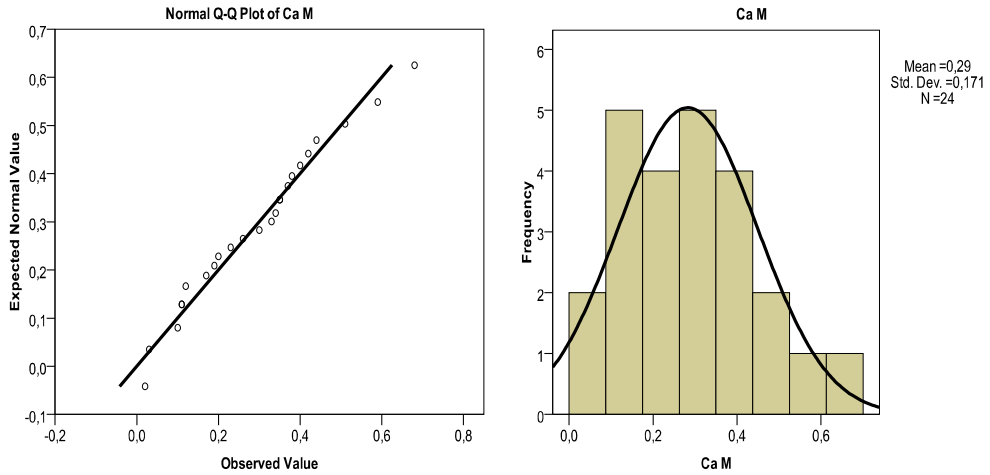

Cu B
Frequency
Cu B
Mean =5,55
Std. Dev. =2,944
N =24
0
2
4
6
8
10
12
0
5
10
15
20

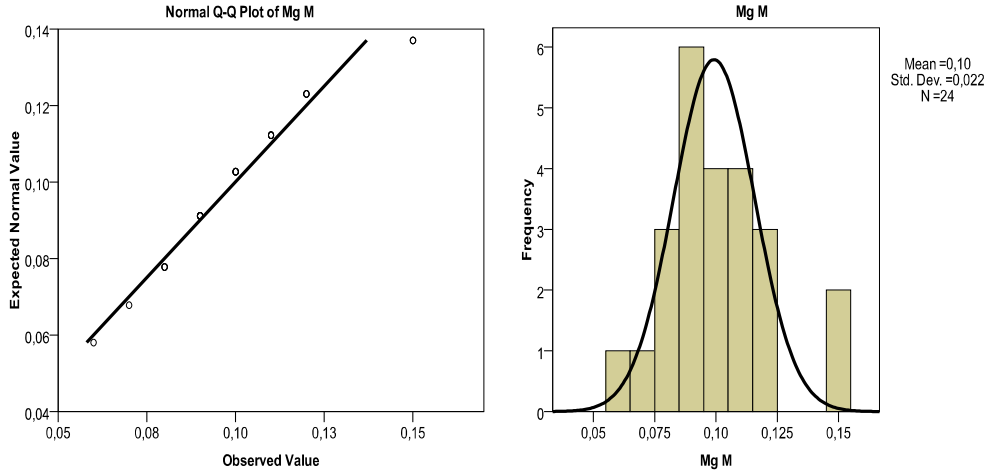

Normal Q-Q Plot of Lg10B B
Expected Normal Value
Observed Value
-0,5
0,0
0,5
1,0
1,5
2,0
-0,5
0,0
0,5
1,0
1,5
2,0

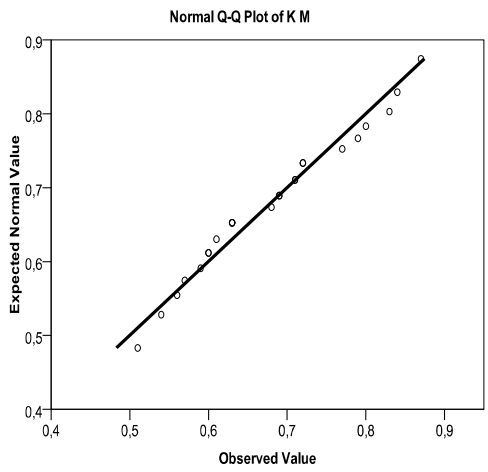

Lg10B B
Frequency
Lg10B B
Mean =0,82
Std. Dev. =0,465
N =24
0
2
4
6
8
10
-0,5
0,0
0,5
1,0
1,5
2,0

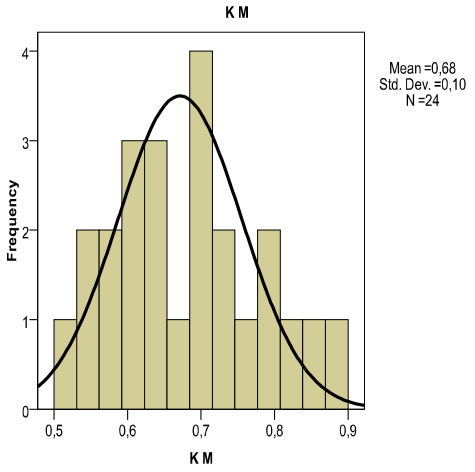
Gráficos Cuantil-Cuantil e Histogramas: “Nutrientes Sarmientos Zona Media”

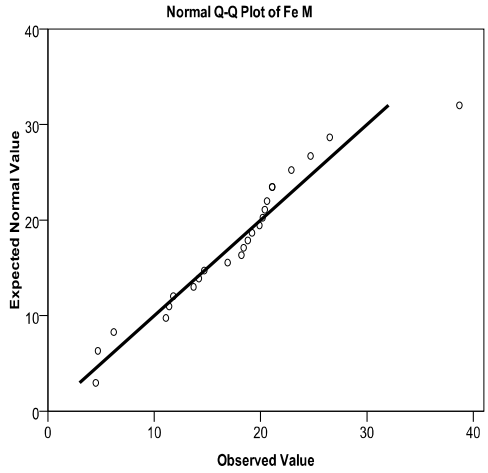


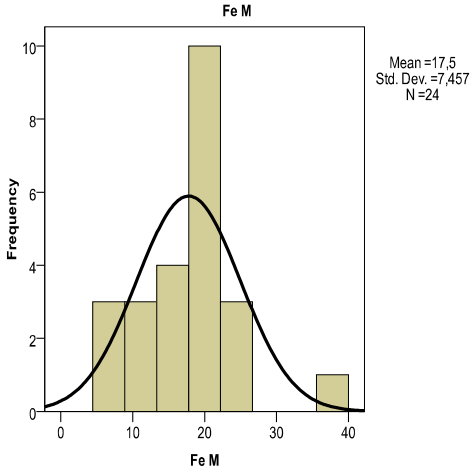


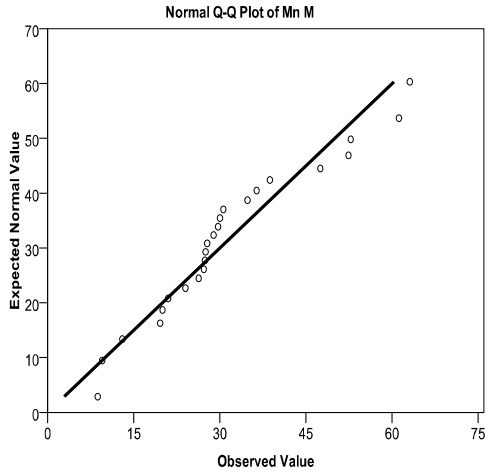


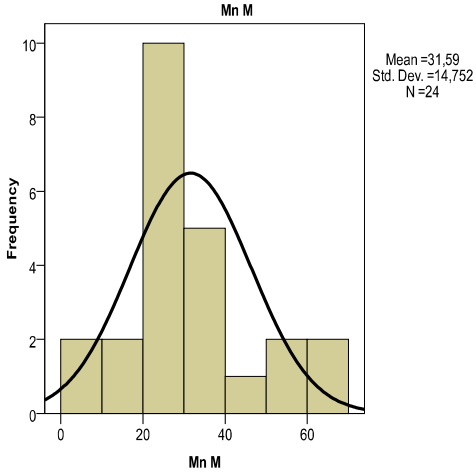

Normal Q-Q Plot of K M
Expected Normal Value
Observed Value
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9

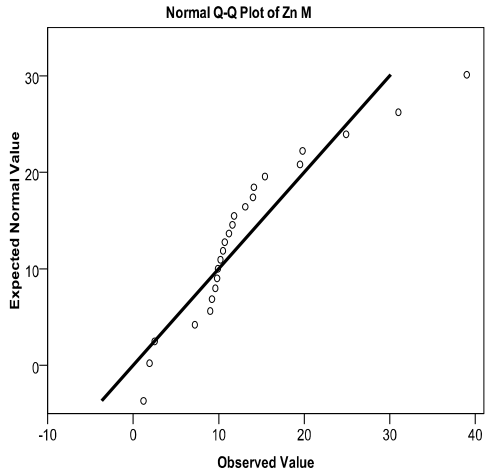

K M
Mean =0,68
Std. Dev. =0,10
N =24
Frequency
K M
0
1
2
3
4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9

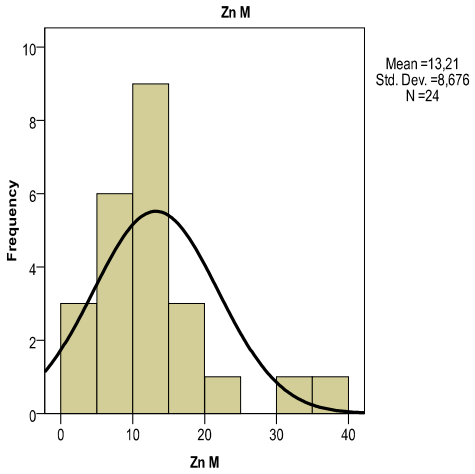

Normal Q-Q Plot of Fe M
Expected Normal Value
Observed Value
0
10
20
30
40

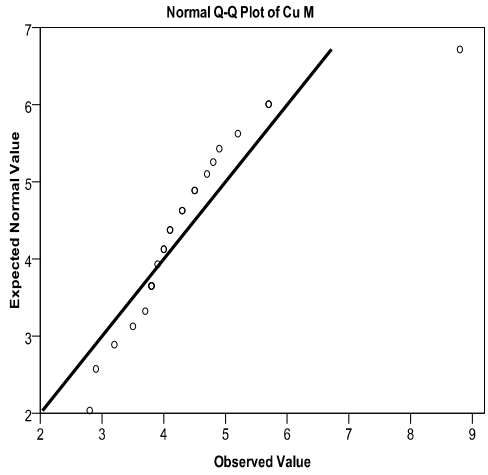

Fe M
Mean =17,5
Std. Dev. =7,457
N =24
Frequency
Fe M
0
2
4
6
8
10
0
10
20
30
40

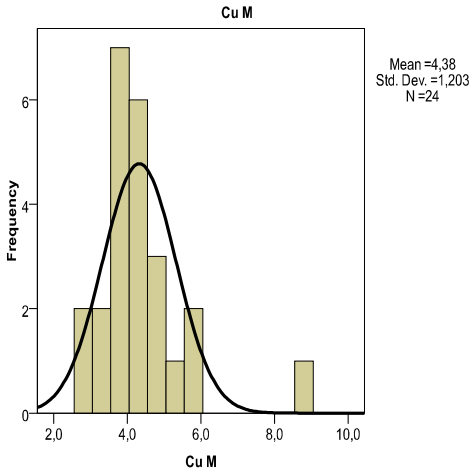

Normal Q-Q Plot of Mn M
Expected Normal Value
Observed Value
0
10
20
30
40
50
60
70
0
15
30
45
60
75

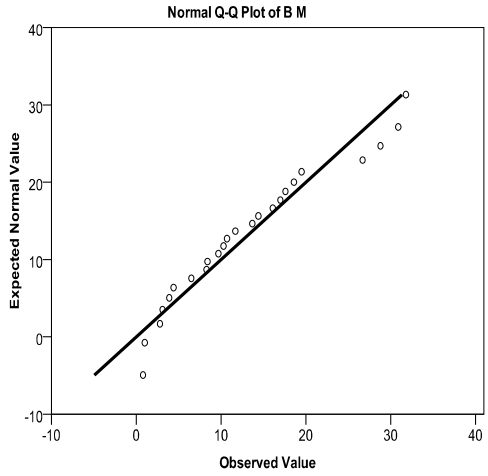

Mn M
Mean =31,59
Std. Dev. =14,752
N =24
Frequency
Mn M
0
2
4
6
8
10
0
20
40
60

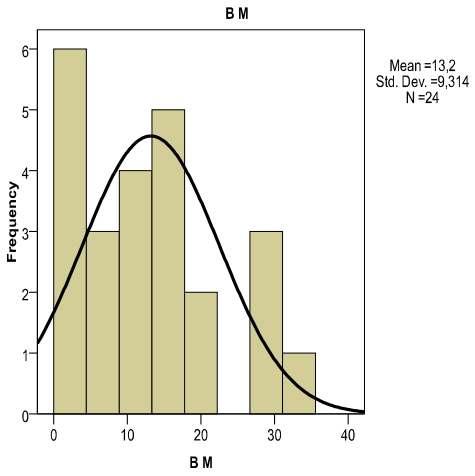

Normal Q-Q Plot of Zn M
Expected Normal Value
Observed Value


Zn M
Mean =13,21
Std. Dev. =8,676
N =24
Frequency
Zn M

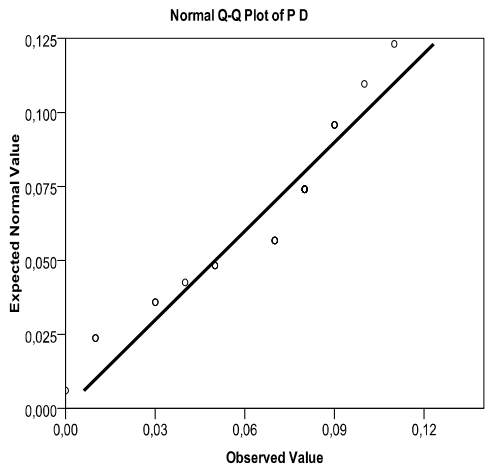

Normal Q-Q Plot of Cu M
Expected Normal Value
Observed Value

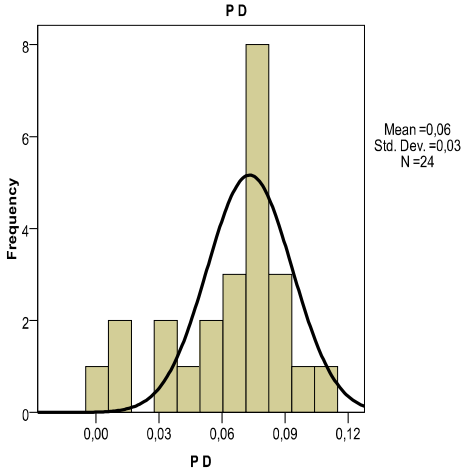

Cu M
Mean =4,38
Std. Dev. =1,203
N =24
Frequency
Cu M

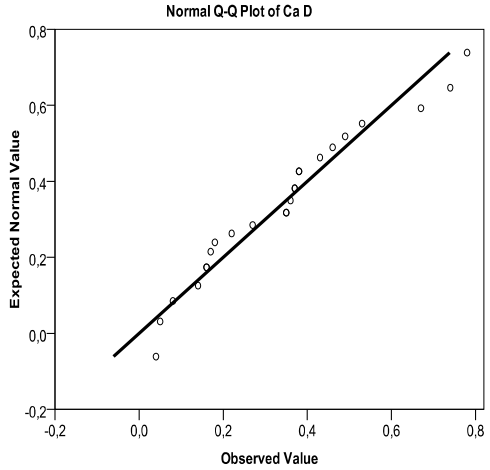

Normal Q-Q Plot of B M
Expected Normal Value
Observed Value

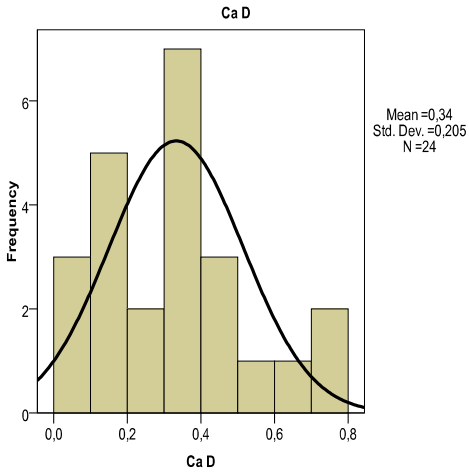

B M
Mean =13,2
Std. Dev. =9,314
N =24
Frequency
B M

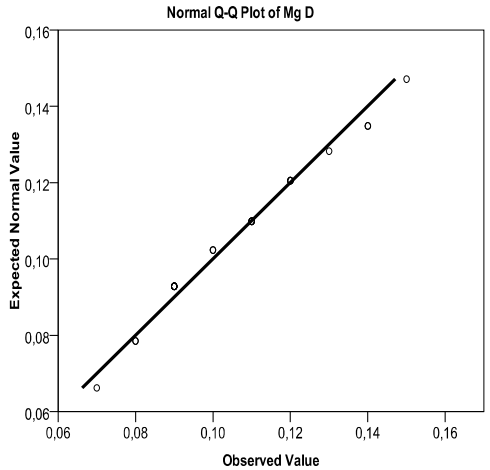
Gráficos Cuantil-Cuantil e Histogramas: “Nutrientes Sarmientos Zona Distal”

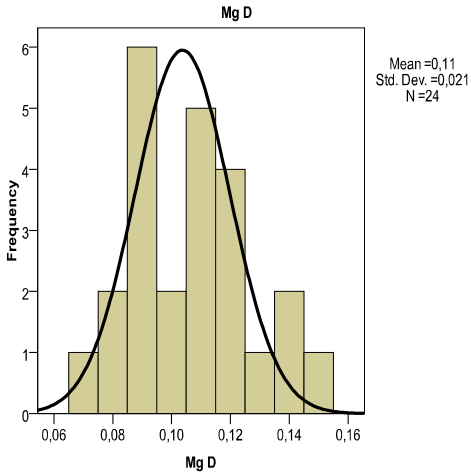


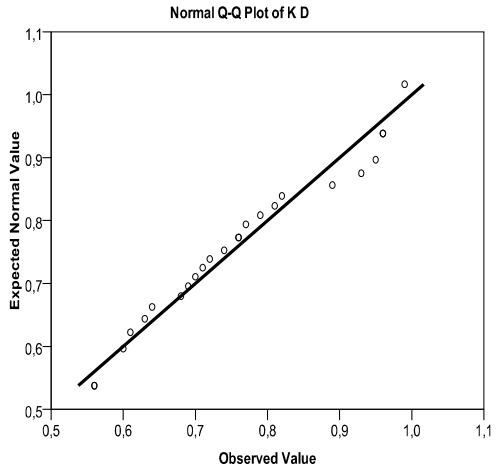


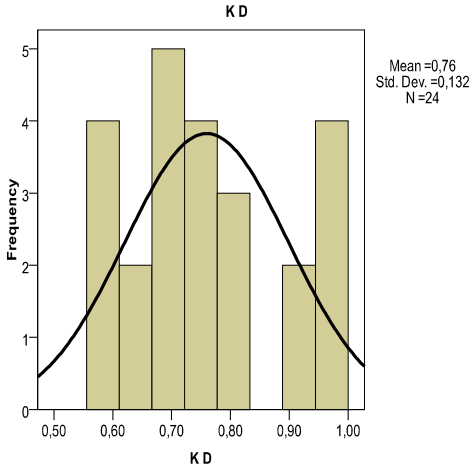


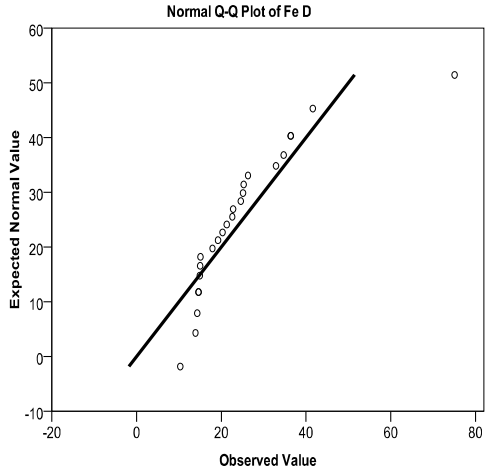


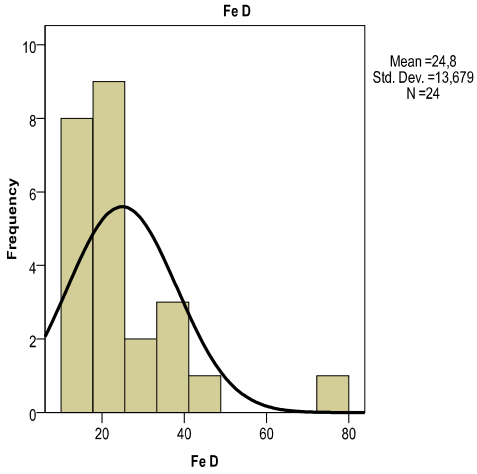


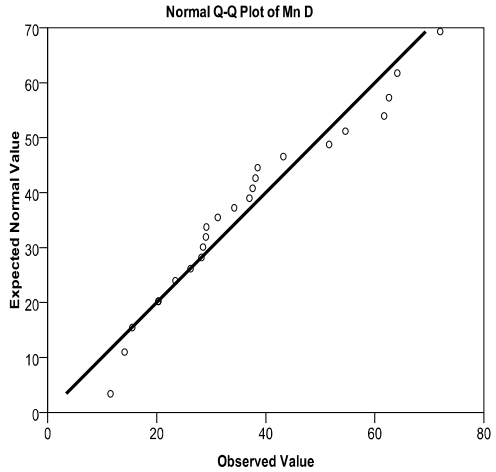


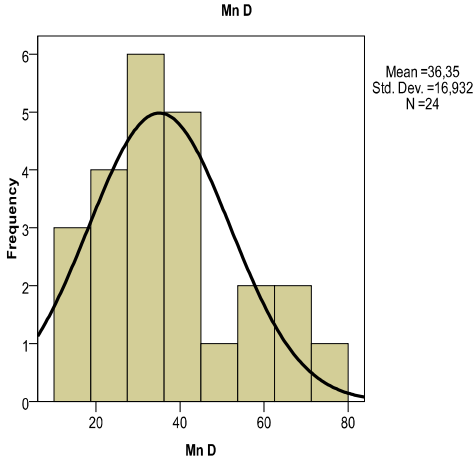

Normal Q-Q Plot of K D
Expected Normal Value
Observed Value
1,1
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1

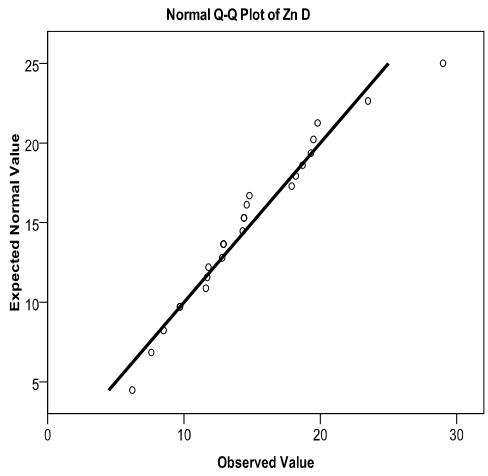

K D
Mean =0,76
Std. Dev. =0,132
N =24
Frequency
K D
0,50
0,60
0,70
0,80
0,90
1,00

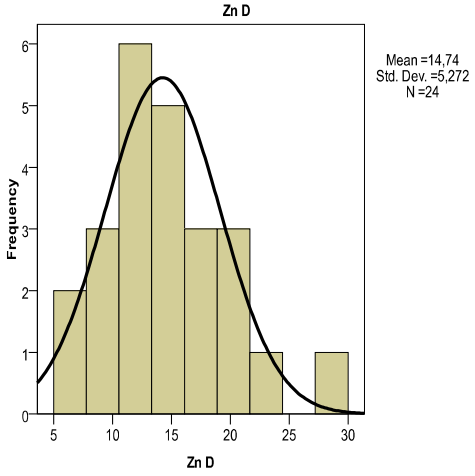

Normal Q-Q Plot of Fe D
Expected Normal Value
Observed Value
60
50
40
30
20
10
0
-10
-20
0
20
40
60
80

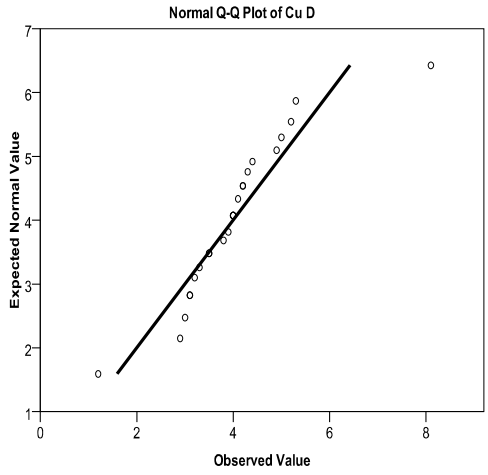

Fe D
Mean =24,8
Std. Dev. =13,679
N =24
Frequency
Fe D
20
40
60
80

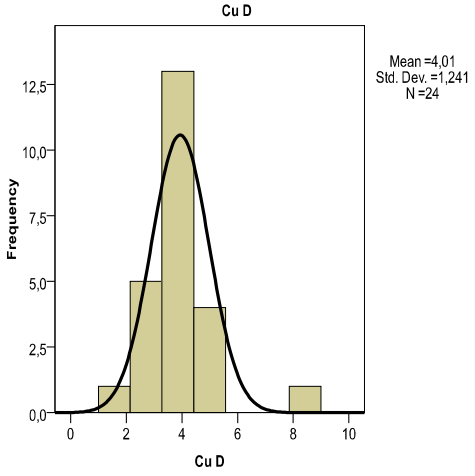

Normal Q-Q Plot of Mn D
Expected Normal Value
Observed Value
70
60
50
40
30
20
10
0
0
20
40
60
80

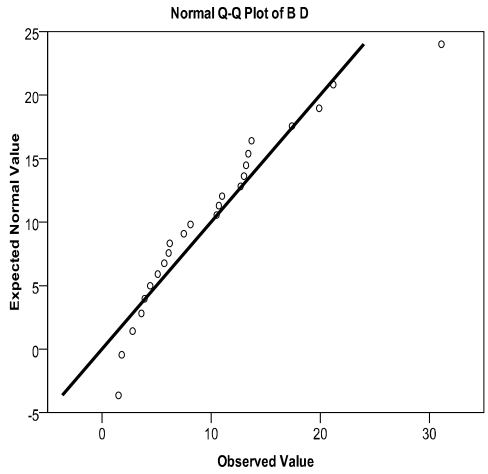

Mn D
Mean =36,35
Std. Dev. =16,932
N =24
Frequency
Mn D
20
40
60
80

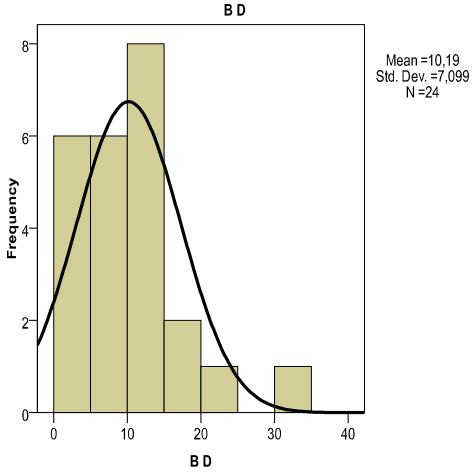

Normal Q-Q Plot of Zn D
Expected Normal Value
Observed Value


Zn D
Mean =14,74
Std. Dev. =5,272
N =24
Frequency
Zn D

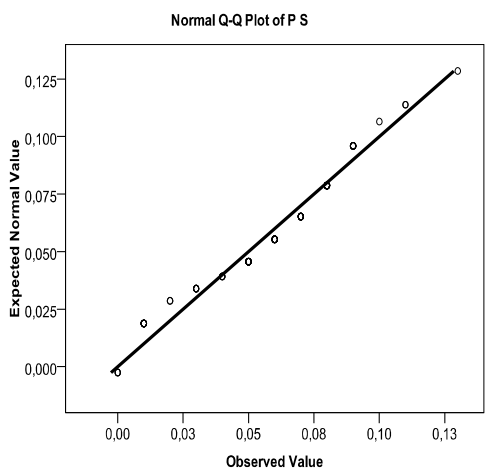

Normal Q-Q Plot of Cu D
Expected Normal Value
Observed Value

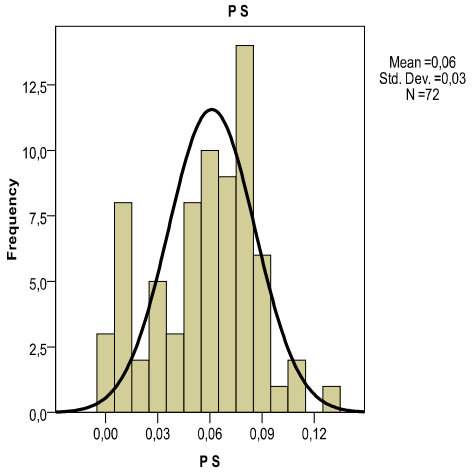

Cu D
Mean =4,01
Std. Dev. =1,241
N =24
Frequency
Cu D

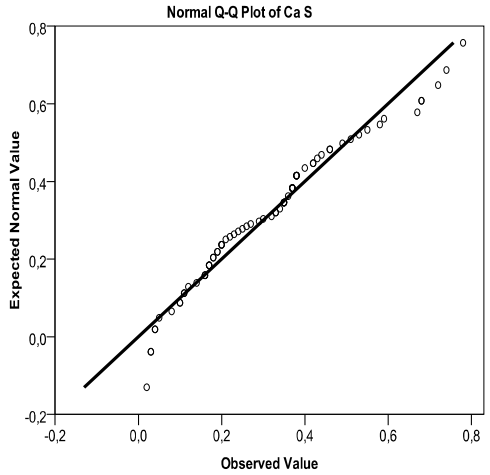

Normal Q-Q Plot of B D
Expected Normal Value
Observed Value

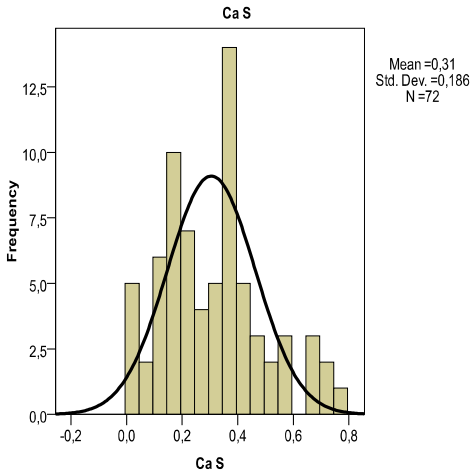

B D
Mean =10,19
Std. Dev. =7,099
N =24
Frequency
B D

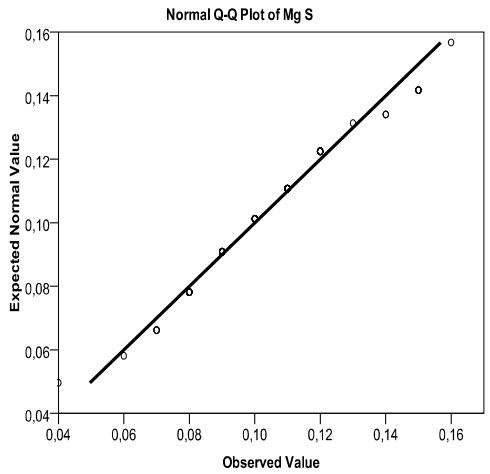
Gráficos Cuantil-Cuantil e Histogramas: “Nutrientes Sarmientos Global”

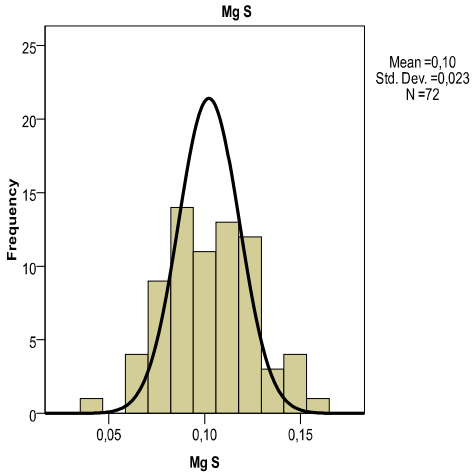


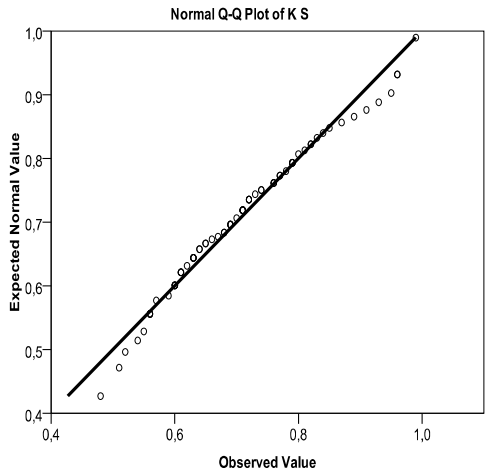


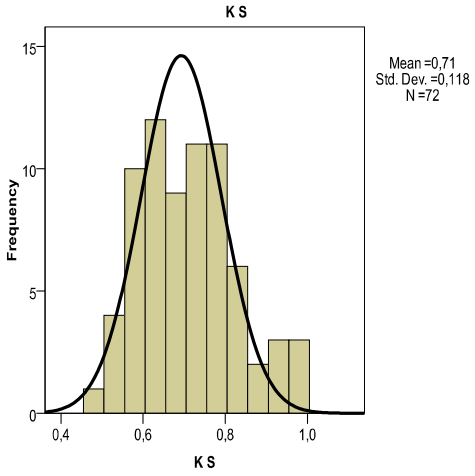


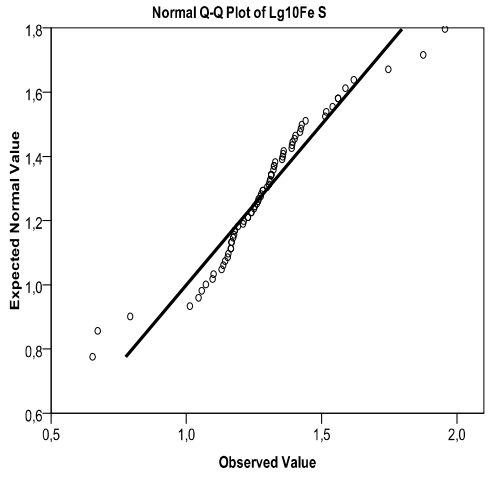


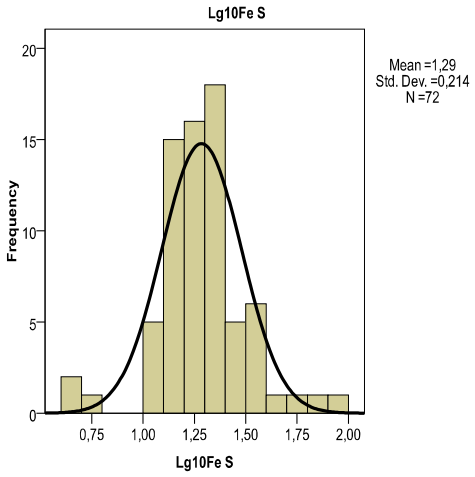


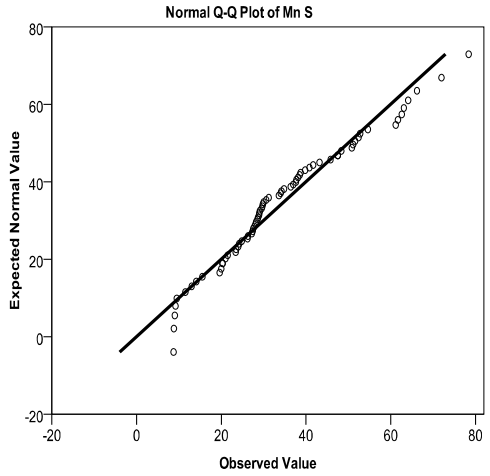


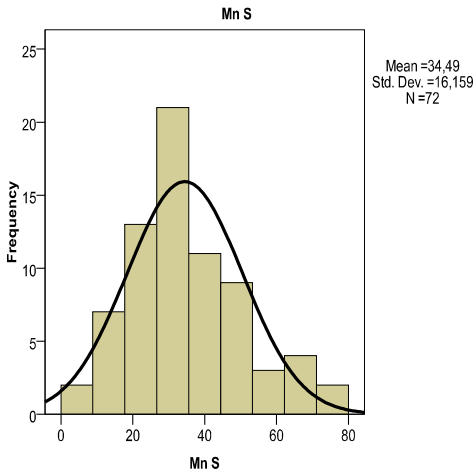

Normal Q-Q Plot of K S
Expected Normal Value
Observed Value
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,4
0,6
0,8
1,0

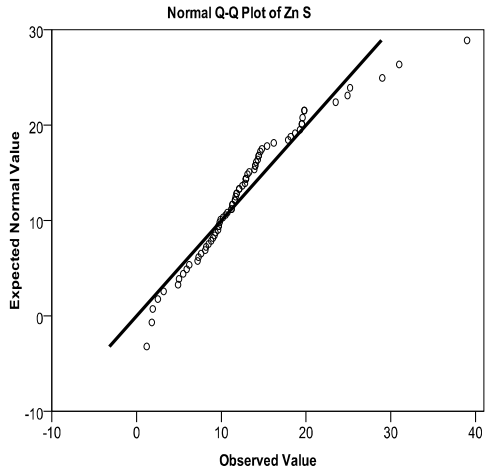

K S
Mean =0,71
Std. Dev. =0,118
N =72
Frequency
K S
15
10
5
0
0,4
0,6
0,8
1,0

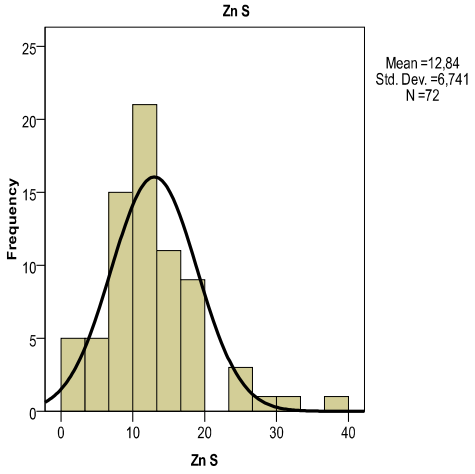

Normal Q-Q Plot of Lg10Fe S
Expected Normal Value
Observed Value
1,8
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,5
1,0
1,5
2,0

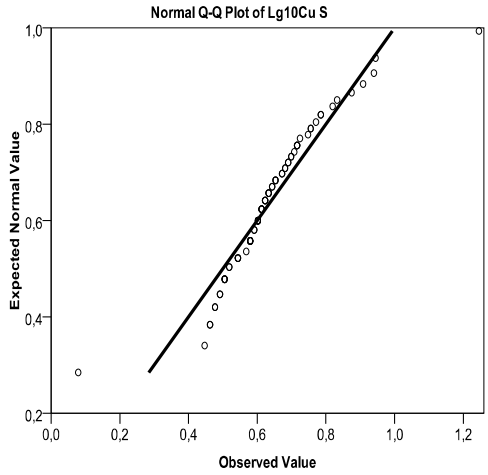

Lg10Fe S
Mean =1,29
Std. Dev. =0,214
N =72
Frequency
Lg10Fe S
20
15
10
5
0
0,75
1,00
1,25
1,50
1,75
2,00

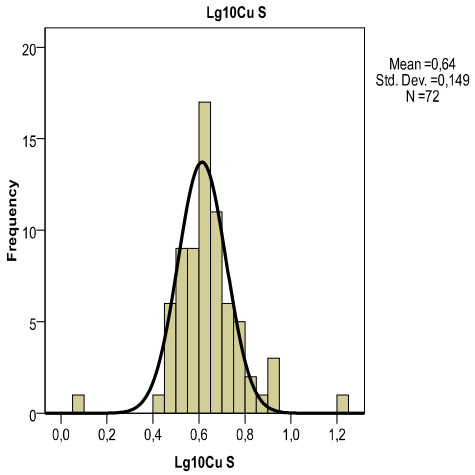

Normal Q-Q Plot of Mn S
Expected Normal Value
Observed Value
80
60
40
20
0
-20
-20
0
20
40
60
80

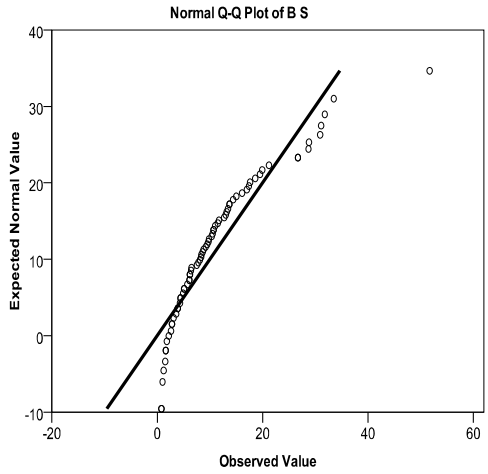

Mn S
Mean =34,49
Std. Dev. =16,159
N =72
Frequency
Mn S
25
20
15
10
5
0
0
20
40
60
80

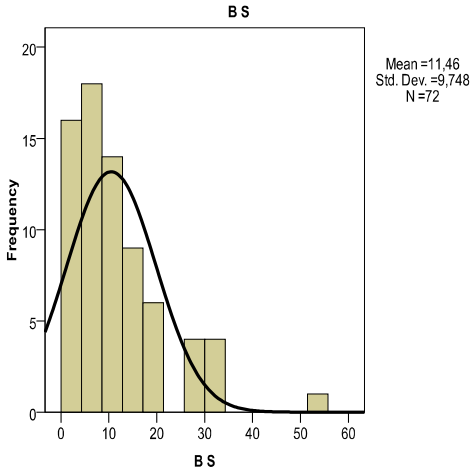

Normal Q-Q Plot of Zn S
Expected Normal Value
Observed Value


Zn S
Mean =12,84
Std. Dev. =6,741
N =72
Frequency
Zn S


Normal Q-Q Plot of Lg10Cu S
Expected Normal Value
Observed Value


Lg10Cu S
Mean =0,64
Std. Dev. =0,149
N =72
Frequency
Lg10Cu S


Normal Q-Q Plot of B S
Expected Normal Value
Observed Value


B S
Mean =11,46
Std. Dev. =9,748
N =72
Frequency
B S

ANEXO VI

Matrices de componentes rotados y sin rotar

ANEXO VI. MATRICES DE COMPONENTES ROTADOS Y SIN ROTAR

Matrices de componentes extraídos: "Parámetros Edáficos"

Component Matrix				
	Component			
	1	2	3	4
ARENA	,641	,661		
pH H_2O	-,725			
M.O.			,609	,417
K			,609	
Mn	,673			
Cu	,648			,507
Lg10ARCILLA	-,624	-,659		
Lg10C.E.	-,471	,636		
Lg10P	,494			
Lg10Ca	-,868			
Lg10Mg	-,765		,440	
Lg10Fe	,880			
Lg10Zn	,660			
Lg10Al			,512	-,707

Rotated Component Matrix				
	Component			
	1	2	3	4
ARENA		,942		
pH H_2O	-,723			-,442
M.O.			,776	
K			,616	
Mn	,783			
Cu	,679		,454	
Lg10ARCILLA		-,936		
Lg10C.E.	-,718			
Lg10P		,517		
Lg10Ca	-,764			
Lg10Mg	-,640	-,521		
Lg10Fe	,788	,407		
Lg10Zn		,446	,455	
Lg10Al				,899

Tabla nº 41: Matrices sin rotar y con rotación ortogonal. Parámetros edáficos

Pattern Matrix				
	Component			
	1	2	3	4
ARENA		,970		
pH H_2O	-,695			,404
M.O.			,785	
K			,607	
Mn	,808			
Cu	,701		,434	
Lg10ARCILLA		-,968		
Lg10C.E.	-,773			
Lg10P		,496		
Lg10Ca	-,706			
Lg10Mg	-,564	-,461		
Lg10Fe	,744			
Lg10Zn			,421	
Lg10Al				-,897

Structure Matrix				
	Component			
	1ª	2	3	4
ARENA		,949		
pH H_2O	-,757			,480
M.O.			,772	
K			,625	
Mn	,785			
Cu	,698		,441	
Lg10ARCILLA		-,939		
Lg10C.E.	-,687			
Lg10P		,553		
Lg10Ca	-,824	-,522		
Lg10Mg	-,694	-,604		
Lg10Fe	,844	,545		
Lg10Zn	,478	,540	,467	
Lg10Al				-,903

Tabla nº 42: Matrices de configuración y estructura. Parámetros edáficos

Component Correlation Matrix				
Component	**1**	**2**	**3**	**4**
1	1,000	,320	,011	-,112
2		1,000	,092	-,036
3			1,000	-,024
4				1,000

Tabla nº 43: Matriz de correlación entre los componentes. Parámetros edáficos

Matrices de componentes extraídos: "Nutrientes Limbos"

Component Matrix				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P L	-,450	-,492		,493
Ca L		,644	,401	
Mg L		,602		
K L	,852			
Fe L			,763	
Mn L	,866			
Zn L		,447		
Cu L	,438	-,606		
B L				,815

Rotated Component Matrix				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P L	-,818			
Ca L			,749	
Mg L			,746	
K L	,532	,569		
Fe L		,686	,481	
Mn L	,824			
Zn L	,457			,454
Cu L		,802		
B L				,825

Tabla nº 44: Matrices sin rotar y con rotación ortogonal. Nutrientes Limbos

Pattern Matrix				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P L	-,848			
Ca L		,751		
Mg L		,768		
K L	,498		,461	
Fe L		,449	,785	
Mn L	,810			
Zn L	,444			,407
Cu L			,750	
B L				,839

Structure Matrix				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P L	-,793			
Ca L		,737		
Mg L		,771		
K L	,570		,553	,458
Fe L			,731	
Mn L	,844			
Zn L	,480			,447
Cu L			,777	
B L				,821

Tabla nº 45: Matrices de configuración y estructura. Nutrientes Limbos

Component Correlation Matrix				
Component	**1**	**2**	**3**	**4**
1	1,000	,055	,087	,126
2		1,000	-,121	-,035
3			1,000	,042
4				1,000

Tabla nº 46: Matriz de correlación entre los componentes. Nutrientes Limbos

Matrices de componentes extraídos: "Nutrientes Peciolos"

Component Matrix[a]				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P P		-,422	,630	-,528
Ca P	,697			
Mg P	,791			
K P		,610	,577	
Fe P			,508	,674
Mn P		,829		
Zn P	,750			
Cu P	-,691			
B P	,567			

Rotated Component Matrix[a]				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P P				,924
Ca P	,680			
Mg P	,851			
K P		,865		
Fe P			,917	
Mn P		,754		-,405
Zn P	,637		,447	
Cu P	-,826			
B P		,423	,550	

Tabla nº 47: Matrices sin rotar y con rotación ortogonal. Nutrientes Peciolos

Pattern Matrix[a]				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P P			,932	
Ca P	,662			
Mg P	,864			
K P		,889		
Fe P				,946
Mn P		,744		
Zn P	,605			
Cu P	-,855			
B P				,515

Structure Matrix				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P P			,922	
Ca P	,704			
Mg P	,851			
K P		,847		
Fe P				,904
Mn P		,769	-,441	
Zn P	,674			,525
Cu P	-,809			
B P		,474		,587

Tabla nº 48: Matrices de configuración y estructura. Nutrientes Peciolos

Component Correlation Matrix				
Component	**1**	**2**	**3**	**4**
1	1,000	,109	-,067	,203
2		1,000	-,083	,097
3			1,000	,101
4				1,000

Tabla nº 49: Matriz de correlación entre los componentes. Nutrientes Peciolos

Matrices de componentes extraídos: "Nutrientes Sarmientos Zona Basal"

Component Matrix[a]				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P B			,738	
Ca B			,813	
Mg B	,694			-,549
K B		,870		
Fe B	,904			
Mn B		,762		,468
Zn B	,693			
Cu B	,875			
B B	,611			,477

Rotated Component Matrix[a]				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P B				,739
Ca B				,850
Mg B		,815		
K B		,450	,817	
Fe B	,828	,471		
Mn B			,897	
Zn B		,688		
Cu B	,811			
B B	,855			

Tabla nº 50: Matrices sin rotar y con rotación ortogonal. Nutrientes Sarmientos. Zona Basal

Pattern Matrix[a]				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P B			,759	
Ca B			,828	
Mg B				-,800
K B		,906		
Fe B	,849			
Mn B		,845		
Zn B		,425		-,498
Cu B	,830			
B B	,875			

Structure Matrix				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P B			,774	
Ca B			,805	
Mg B	,420			-,841
K B		,903		
Fe B	,904			-,470
Mn B		,826		
Zn B	,445	,509		-,608
Cu B	,879			
B B	,824			

Tabla nº 51: Matrices de configuración y estructura. Nutrientes Sarmientos. Zona Basal

Component Correlation Matrix				
Component	**1**	**2**	**3**	**4**
1	1,000	,128	,056	-,197
2		1,000	,010	-,094
3			1,000	,037
4				1,000

Tabla nº 52: Matriz de correlación entre los componentes. Nutrientes Sarmientos. Zona Basal

Matrices de componentes extraídos: "Nutrientes Sarmientos Zona Media"

Component Matrix[a]				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P M		,729		
Ca M	,532			
Mg M	,666		,501	
K M	-,697			
Fe M			,687	-,629
Mn M	-,638	,603		
Zn M	-,645			
Cu M			,433	,580
B M	,549	,586		

Rotated Component Matrix[a]				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P M		,834		
Ca M		,495		
Mg M	-,436		,765	
K M	,804			
Fe M				,940
Mn M	,933			
Zn M	,426			,460
Cu M			,806	
B M		,742		

Tabla nº 53: Matrices sin rotar y con rotación ortogonal. Nutrientes Sarmientos. Zona Media

Pattern Matrix[a]				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P M		,874		
Ca M		,452		
Mg M				,745
K M	-,810			
Fe M			,955	
Mn M	-,956			
Zn M			,416	
Cu M				,839
B M		,720		

Structure Matrix				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P M		,818		
Ca M		,531		
Mg M	,499			,791
K M	-,818			
Fe M			,933	
Mn M	-,918			
Zn M	-,488		,493	
Cu M				,795
B M		,745		,447

Tabla nº 54: Matrices de configuración y estructura. Nutrientes Sarmientos. Zona Media

Component Correlation Matrix				
Component	1	2	3	4
1	1,000	,108	-,096	,201
2		1,000	-,114	,144
3			1,000	-,070
4				1,000

Tabla nº 55: Matriz de correlación entre los componentes. Nutrientes Sarmientos. Zona Media

Matrices de componentes extraídos: "Nutrientes Sarmientos Zona Distal"

Component Matrix[a]			
	Component		
	1	2	3
P D	,688		
Ca D	,497	,684	
Mg D		,767	
K D	,862		
Fe D	,533		
Mn D	,710		
Zn D	,464		-,670
Cu D			,585
B D		,574	,540

Rotated Component Matrix[a]			
	Component		
	1	2	3
P D	,597		
Ca D		,893	
Mg D		,797	
K D	,831		
Fe D	,657		
Mn D	,816		
Zn D			-,664
Cu D			,658
B D			,759

Tabla nº 56: Matrices sin rotar y con rotación ortogonal. Nutrientes Sarmientos. Zona Distal

Pattern Matrix[a]			
	Component		
	1	2	3
P D	,581		
Ca D		,890	
Mg D		,810	
K D	,820		
Fe D	,671		
Mn D	,826		
Zn D			-,682
Cu D			,655
B D			,749

Structure Matrix			
	Component		
	1	2	3
P D	,617		
Ca D		,902	
Mg D		,781	
K D	,833		
Fe D	,650		
Mn D	,814		
Zn D			-,662
Cu D			,658
B D			,761

Tabla nº 57: Matrices de configuración y estructura. Nutrientes Sarmientos. Zona Distal

Component Correlation Matrix			
Component	**1**	**2**	**3**
1	1,000	,090	,028
2		1,000	,030
3			1,000

Tabla nº 58: Matriz de correlación entre los componentes. Nutrientes Sarmientos. Zona Distal

Matrices de componentes extraídos: "Nutrientes Sarmientos Global"

Component Matrix[a]				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P S	,438			-,553
Ca S		,513	,725	
Mg S		,646		,536
K S	,768	-,420		
Mn S	,682			-,421
Zn S	,517			,517
B S		,688		
Lg10Fe S	,628			
Lg10Cu S			-,627	

Rotated Component Matrix[a]				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P S				,811
Ca S			,742	,537
Mg S			,814	
K S	,835			
Mn S	,498		-,431	,569
Zn S	,775			
B S		,714		
Lg10Fe S	,573	,504		
Lg10Cu S		,821		

Tabla nº 59: Matrices sin rotar y con rotación ortogonal. Nutrientes Sarmientos Global

Pattern Matrix[a]				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P S				-,788
Ca S			,835	
Mg S			,759	
K S	,803			
Mn S	,408			-,651
Zn S	,798			
B S		,718		
Lg10Fe S	,565	,483		
Lg10Cu S		,828		

Structure Matrix				
	Component			
	1	**2**	**3**	**4**
P S				-,789
Ca S			,823	-,407
Mg S			,771	
K S	,822			-,425
Mn S	,488			-,682
Zn S	,775			
B S		,733		
Lg10Fe S	,597	,535		
Lg10Cu S		,811		

Tabla nº 60: Matrices de configuración y estructura. Nutrientes Sarmientos Global

Component Correlation Matrix				
Component	**1**	**2**	**3**	**4**
1	1,000	,084	-,044	-,081
2		1,000	,111	-,037
3			1,000	-,020
4				1,000

Tabla nº 61: Matriz de correlación entre los componentes. Nutrientes Sarmientos Global

ANEXO VII

Matrices de correlaciones

ANEXO VII. MATRICES DE CORRELACIONES

Correlation Matrix

		ARENA	pH H_2O	M.O.	K	Mn	Cu	Lg10ARCILLA	Lg10C.E.	Lg10P	Lg10Ca	Lg10Mg	Lg10Fe	Lg10Zn	Lg10Al
Correlation	ARENA	1,00	-,224	,012	,138	,225	,256	-,974	,033	,388	-,430	-,457	,477	,470	,085
	pH H_2O	-,224	1,00	,173	,089	,444	,353	,214	,526	-,302	,690	,513	-,651	-,369	-,387
	M.O.	,012	,173	1,00	,179	,031	,182	,018	,071	-,032	,119	,263	-,022	,177	,020
	K	,138	-,089	,179	1,00	,136	,204	-,193	,047	,065	-,156	,105	,075	,301	,206
	Mn	,225	-,444	,031	,136	1,00	,562	-,202	-,409	,247	-,553	-,475	,643	,299	-,024
	Cu	,256	-,353	,182	,204	,562	1,00	-,224	-,290	,296	-,459	-,385	,598	,487	-,005
	Lg10ARCILLA	-,974	,214	,018	,193	,202	,224	1,00	-,026	-,348	,444	,454	-,450	-,427	-,079
	Lg10C.E.	,033	,526	,071	,047	,409	,290	-,026	1,00	-,034	,518	,277	-,433	-,186	-,201
	Lg10P	,388	-,302	,032	,065	,247	,296	-,348	-,034	1,00	-,332	-,404	,322	,275	-,029
	Lg10Ca	-,430	,690	,119	,156	,553	,459	,444	,518	-,332	1,00	,768	-,723	-,439	-,247
	Lg10Mg	-,457	,513	,263	,105	,475	,385	,454	,277	-,404	,768	1,00	-,650	-,342	,033
	Lg10Fe	,477	-,651	,022	,075	,643	,598	-,450	-,433	,322	-,723	-,650	1,00	,568	,139
	Lg10Zn	,470	-,369	,177	,301	,299	,487	-,427	-,186	,275	-,439	-,342	,568	1,00	,319
	Lg10Al	,085	-,387	,020	,206	,024	,005	-,079	-,201	-,029	-,247	,033	,139	,319	1,00

Tabla nº 62: Matriz de correlaciones. Parámetros edáficos

Correlation Matrix

		P L	**Ca L**	**Mg L**	**K L**	**Fe L**	**Mn L**	**Zn L**	**Cu L**	**B L**
Correlation	**P L**	1,00	-,087	-,025	-,191	-,103	-,491	-,184	,188	,123
	Ca L	-,087	1,00	,277	,109	,223	,072	,099	-,251	,096
	Mg L	-,025	,277	1,00	-,368	,089	-,253	,179	-,175	,026
	K L	-,191	,109	-,368	1,00	,132	,603	,197	,475	,161
	Fe L	-,103	,223	,089	,132	1,00	,318	-,086	,288	-,056
	Mn L	-,491	,072	-,253	,603	,318	1,00	,275	,115	,154
	Zn L	-,184	,099	,179	,197	-,086	,275	1,00	-,034	,086
	Cu L	,188	-,251	-,175	,475	,288	,115	-,034	1,00	,002
	B L	,123	,096	,026	,161	-,056	,154	,086	,002	1,00

Tabla nº 63: Matriz de correlaciones. Nutrientes Limbos

Correlation Matrix										
		P P	Ca P	Mg P	K P	Fe P	Mn P	Zn P	Cu P	B P
Correlation	P P	1,00	-,226	,085	,189	,108	-,272	,127	,034	-,039
	Ca P	-,226	1,00	,407	,037	,069	,194	,361	-,473	,246
	Mg P	,085	,407	1,00	-,084	,068	-,065	,588	-,546	,341
	K P	,189	,037	-,084	1,00	-,030	,381	,124	,095	,263
	Fe P	,108	,069	,068	-,030	1,00	-,086	,346	,037	,280
	Mn P	-,272	,194	-,065	,381	-,086	1,00	,067	-,123	,215
	Zn P	,127	,361	,588	,124	,346	,067	1,00	-,338	,254
	Cu P	,034	-,473	-,546	,095	,037	-,123	-,338	1,00	-,183
	B P	-,039	,246	,341	,263	,280	,215	,254	-,183	1,00

Tabla nº 64: Matriz de correlaciones. Nutrientes Peciolos

Correlation Matrix										
		P B	Ca B	Mg B	K B	Fe B	Mn B	Zn B	Cu B	B B
Correlation	P B	1,00	,328	,068	,007	,010	,223	,015	,092	,098
	Ca B	,328	1,00	,334	,036	,103	,037	-,087	-,027	,095
	Mg B	,068	,334	1,00	,184	,548	-,074	,437	,496	,221
	K B	,007	,036	,184	1,00	,054	,590	,482	,113	-,169
	Fe B	,010	,103	,548	,054	1,00	,034	,508	,876	,619
	Mn B	,223	,037	-,074	,590	,034	1,00	,103	,201	,095
	Zn B	,015	-,087	,437	,482	,508	,103	1,00	,475	,221
	Cu B	,092	-,027	,496	,113	,876	,201	,475	1,00	,492
	B B	,098	,095	,221	-,169	,619	,095	,221	,492	1,000

Tabla nº 65: Matriz de correlaciones. Nutrientes Sarmientos. Zona Basal

Correlation Matrix										
		P M	Ca M	Mg M	K M	Fe M	Mn M	Zn M	Cu M	B M
Correlation	P M	1,00	,180	-,227	-,114	,053	,194	-,172	,004	,332
	Ca M	,180	1,00	,338	-,136	-,249	-,100	-,204	,000	,400
	Mg M	-,227	,338	1,00	-,248	,076	-,420	-,233	,366	,245
	K M	-,114	-,136	-,248	1,00	,116	,627	,352	-,074	-,213
	Fe M	,053	-,249	,076	,116	1,00	-,019	,239	-,073	,211
	Mn M	,194	-,100	-,420	,627	-,019	1,00	,320	,138	-,083
	Zn M	-,172	-,204	-,233	,352	,239	,320	1,00	-,223	-,212
	Cu M	,004	,000	,366	-,074	-,073	,138	-,223	1,00	,261
	B M	,332	,400	,245	-,213	,211	-,083	-,212	,261	1,00

Tabla nº 66: Matriz de correlaciones. Nutrientes Sarmientos. Zona Media

Correlation Matrix

		P D	Ca D	Mg D	K D	Fe D	Mn D	Zn D	Cu D	B D
Correlation	P D	1,00	,396	-,072	,373	,179	,343	,208	,204	,346
	Ca D	,396	1,00	,550	,315	-,021	,037	,251	-,039	,345
	Mg D	-,072	,550	1,00	,083	-,261	-,253	,014	,143	,143
	K D	,373	,315	,083	1,00	,393	,706	,505	-,011	-,078
	Fe D	,179	-,021	-,261	,393	1,00	,357	,186	,075	,128
	Mn D	,343	,037	-,253	,706	,357	1,00	,023	,129	,103
	Zn D	,208	,251	,014	,505	,186	,023	1,00	-,205	-,272
	Cu D	,204	-,039	,143	-,011	,075	,129	-,205	1,00	,260
	B D	,346	,345	,143	-,078	,128	,103	-,272	,260	1,00

Tabla nº 67: Matriz de correlaciones. Nutrientes Sarmientos. Zona Distal

Correlation Matrix

		P	Ca	Mg	K	Mn	Zn	B	Lg10Fe	Lg10Cu
Correlation	P	1,00	,316	-,050	,159	,259	,028	,212	,108	,070
	Ca	,316	1,00	,412	,132	,011	-,017	,229	-,032	-,119
	Mg	-,050	,412	1,00	,057	-,215	,050	,192	,166	,248
	K	,159	,132	,057	1,00	,635	,435	-,171	,329	,038
	Mn	,259	,011	-,215	,635	1,00	,155	,026	,175	,233
	Zn	,028	-,017	,050	,435	,155	1,00	-,068	,332	-,028
	B	,212	,229	,192	-,171	,026	-,068	1,00	,296	,330
	Lg10Fe	,108	-,032	,166	,329	,175	,332	,296	1,00	,202
	Lg10Cu	,070	-,119	,248	,038	,233	-,028	,330	,202	1,00

Tabla nº 68: Matriz de correlaciones. Nutrientes Sarmientos Global