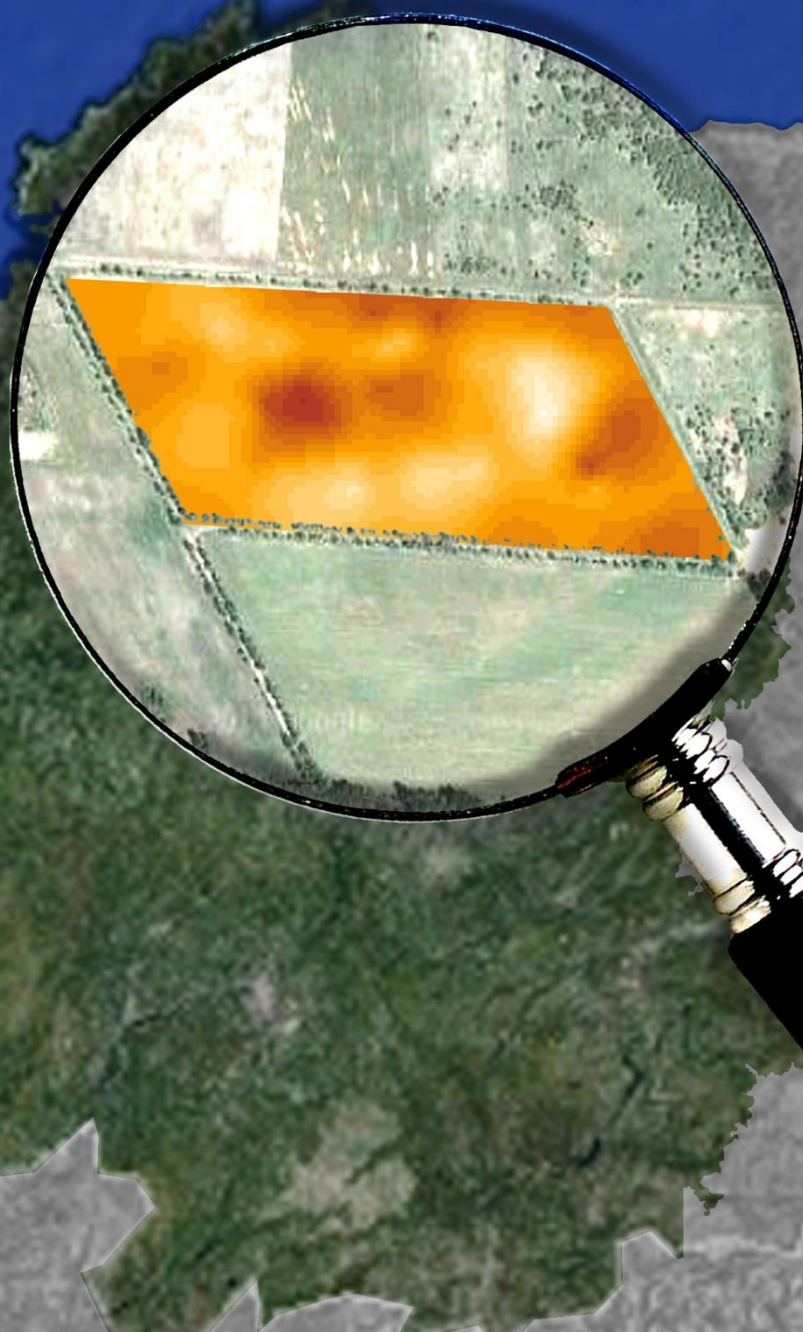


TESIS DOCTORAL

APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS AL ESTUDIO DEL SUELO



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

FACULTAD DE CIENCIAS
ÁREA DE EDAFOLOGÍA Y QUÍMICA AGRÍCOLA

AITOR GARCÍA TOMILLO

JULIO 2014



FACULTAD DE CIENCIAS

Área de Edafología y Química Agrícola

TESIS DOCTORAL

Aplicación de métodos geofísicos al estudio del suelo

Autor:

Aitor García Tomillo

Directores:

Antonio Paz González

Jorge Dafonte Dafonte



Dn. Jorge Dafonte Dafonte, Profesor Titular del área de Ingeniería Agroforestal en la Escuela Politécnica Superior de Lugo de la Universidade de Santiago de Compostela (USC), y **Dn. Antonio Paz González**, Catedrático de Edafología y Química Agrícola en La Facultad de Ciencias de la Universidade da Coruña (UDC),

CERTIFICAN:

Que la presente Memoria titulada “**Aplicación de métodos geofísicos al estudio del suelo**” que para optar al grado de Doctor por la Universidade da Coruña presenta **Dn. Aitor García Tomillo**, ha sido realizada bajo nuestra dirección y supervisión dentro del programa oficial de Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental de la UDC.

Considerando que constituye trabajo de *Tesis Doctoral*, autorizamos su presentación.

Y para que así conste, expedimos el presente certificado en A Coruña, a 30 de Junio de 2014

Fdo. Jorge Dafonte Dafonte

Fdo. Antonio Paz González

***A María y a mis padres;
sin ellos, este trabajo no hubiese sido posible.***

“¡Qué extraña cosa el conocimiento! Una vez que ha penetrado en la mente, se aferra a ella como la hiedra a la roca”. (Frankenstein, Mary Shelley)

AGRADECIMIENTOS

La presente Tesis es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas leyendo, relejendo, opinando, corrigiendo, ayudándome en definitiva, dándome ánimos y acompañándome en los momentos de mayor dificultad.

Agradezco al **Dr. Antonio Paz González** y al **Dr. Jorge Dafonte Dafonte** por haber confiado en mí, por la paciencia y por la dirección de este trabajo.

Al **Dr. Sidney Rosa Vieira** por su ayuda con el estudio Geoestadístico.

A la **Dra. Eva Vidal** y el **Dr. Marcos Lado**, del área de Edafología y Química agrícola de la Facultad de Ciencias de la Universidad de A Coruña, porque siempre que he necesitado su ayuda me la han brindado.

Gracias también a mis queridos compañeros del laboratorio, **Rosane, Antón e Irene** por hacer más llevadero este trabajo, por su ayuda y su amistad.

A **Silvia**, por su ayuda con la portada y la presentación.

A todos los **amigos** con los que he disfrutado “lejos de la Tesis” durante estos tres años, lo que me ha permitido coger fuerzas cuando era necesario.

Gracias a **todos** los que de alguna manera colaboraron en la redacción, datos, bibliografía, presentación y se me haya olvidado mencionar.

A **Begoña y Marino**; mis padres porque siempre me han apoyado y animado.

A **María**, por estar siempre ahí.

Gracias.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 FORMACIÓN DEL SUELO	1
1.2 SUELOS DE GALICIA.....	5
1.3 AGRICULTURA DE PRECISIÓN.....	13
1.4 ESTADÍSTICA & GEOESTADÍSTICA	17
1.5 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE DEL SUELO	21
1.6 OBJETIVOS	25
CAPÍTULO 2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE_a) MUESTREO OPTIMIZADO & TOPOGRAFÍA DE LA PARCELA ESTUDIADA	27
2.1 ÁREA DE ESTUDIO	27
2.1.1 La Comarca de Terra Chá	27
2.1.2 Parcela experimental.....	30
2.2 MEDIDA EN CONTINUO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE .	33
2.3 RED DE MUESTREO OPTIMIZADO A PARTIR DE LA CE _a	37
2.4 RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES TOPOGRÁFICAS & LA CE _a	40
2.5 CONCLUSIONES.....	44
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES GENERALES	45
3.1 INTRODUCCIÓN	45
3.1 PROPIEDADES ESTUDIADAS.....	47
3.2.1 pH	47
3.2.2 Propiedades de cambio	49
3.2.3 Materia orgánica	57
3.2.4 Granulometría.....	59
3.3 MATERIAL & METODOS	62
3.3.1 pH	62
3.3.2 Materia Orgánica	62
3.3.3 Capacidad de intercambio catiónico	63
3.3.4 Análisis granulométrico.....	64
3.3.5 Porcentaje de saturación de bases	65
3.4 RESULTADOS & DISCUSIÓN	66
3.4.1 Profundidad de muestreo 0-20 cm	66
3.4.2 Profundidad de muestreo >20 cm	77
3.4.3 Horizonte A	85
3.5 CONCLUSIONES.....	95

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS ELEMENTOS EXTRAÍDOS	99
4.1 INTRODUCCIÓN	99
4.2 PROPIEDADES ESTUDIADAS.....	101
4.2.1 Macronutrientes	101
4.1.2 Micronutrientes	106
4.2.3 Metales Pesados	112
4.3 MATERIAL & MÉTODOS	121
4.3.1 Extracción con la solución ácida Mehlich-3.....	121
4.3.2 Extracción con el agente quelante DTPA.....	122
4.4 RESULTADOS & DISCUSIÓN	124
4.4.1 Profundidad de muestreo 0-20cm.....	124
4.4.2 Profundidad de muestreo >20 cm	151
4.4.3 Horizonte A	176
4.5 CONCLUSIONES.....	199
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO	203
5.1 INTRODUCCIÓN	203
5.1.1 Conceptos esenciales en Geoestadística	205
5.1.2 Análisis y representación de la dependencia espacial	207
5.2 MATERIAL & MÉTODOS	223
5.3 RESULTADOS & DISCUSIÓN	228
5.3.1 Variabilidad espacial de las propiedades generales.....	228
5.3.1.1 Profundidad de muestreo 0-20 cm.....	228
5.3.1.2 Profundidad de muestreo >20 cm	233
5.3.1.3 Horizonte A	239
5.3.2 Variabilidad espacial de las propiedades químicas	246
5.3.2.1 Profundidad de muestreo 0-20 cm (Mehlich-3).....	246
5.2.2.2 Profundidad de muestreo 0-20 cm (DTPA)	252
5.2.2.3 Profundidad de muestreo >20 cm (Mehlich-3)	254
5.2.2.4 Profundidad de muestreo >20 cm (DTPA).....	260
5.2.2.5 Horizonte A (Mehlich-3)	265
5.2.2.6 Horizonte A (DTPA).....	270
5.4 CONCLUSIONES.....	273
CAPITULO 6 CONCLUSIONES GENERALES	275
SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS	279
BIBLIOGRAFÍA	281

-RESUMEN-

La sostenibilidad de la productividad agrícola y forestal depende de las propiedades y la buena calidad del suelo. La variabilidad de las propiedades del suelo es de interés, puesto que realizando un manejo localizado se favorece la reducción de costes de producción, aprovechándose mejor las materias primas y el uso de la maquinaria agrícola. La *agricultura de precisión* busca, mediante técnicas de aplicación localizada de fertilizantes, fitosanitarios y nuevos métodos de medida de las propiedades de los suelos, un mayor rendimiento económico de la zona cultivada así como un menor impacto ambiental. Esta tesis doctoral tiene como objetivo estudiar la variabilidad estadística y espacial de las propiedades generales del suelo y de los elementos extraídos en una parcela representativa de la Comarca de Terra Chá (creándose además mapas de variabilidad espacial de los mismos). Además, se estudian las posibles relaciones entre la conductividad eléctrica aparente (CE_a) del suelo, las propiedades generales y los elementos extraídos. Se relacionan tanto las propiedades generales como los elementos extraídos con la conductividad eléctrica aparente (CE_a) del suelo (horizontal y vertical). La toma de muestras se realizó una vez obtenida la red de muestreo optimizado en función de las medidas de CE_a . Se obtuvieron 80 puntos de muestreo a profundidad 0 a 20 cm y >20 cm en el Horizonte A. En estos puntos se muestrearon las siguientes propiedades generales: MO, pH, Ca, P, Mg, K, Al, H+Al, SB, CIC, V, arcilla, limo y arena. Los elementos fueron extraídos en esos puntos mediante dos métodos, con Mehlich-3 (Ca, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Cr, Ni y Pb) y con DTPA (Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Cr, Ni y Pb). Las propiedades generales, en cuanto sus coeficientes de variación, se ordenan de la siguiente forma: $pH < CE_aH < CIC < MO < H+Al < CE_aV < SB < K < Ca < V < Al < Mg$; los elementos obtenidos mediante Mehlich-3: $Fe < Ni < Cr < Cu < Cd < Pb < K < P < Ca < Zn < Mn$ y para la extracción por DTPA: $Cd < Ni < Fe < Cu < Pb < Mn < Zn < Cr$. La CE_aH presenta correlaciones lineales altamente significativas con la MO (negativa), arcilla, arena (negativa), $P_{Mehlich-3}$ y Ni_{DTPA} y la CE_aV las tiene con la MO (negativa), Ca, P, SB, arcilla, arena (negativa), Fe_{DTPA} , Cd_{DTPA} , Ni_{DTPA} , Pb_{DTPA} , $Cd_{Mehlich-3}$, $Ni_{Mehlich-3}$ y $Pb_{Mehlich-3}$. La dependencia espacial de la CE_aH y CE_aV es fuerte en ambos casos ajustándose al modelo esférico de semivariograma. De las propiedades generales 10 de 14 presentan dependencia

espacial (cinco modelos esféricos y cinco exponenciales) siendo fuerte para MO, pH, P, arcilla y arena. De los elementos extraídos por Mehlich-3 presentan dependencia espacial 10 de 11 (8 modelos exponenciales y 2 esféricos) siendo fuerte la dependencia para K, Cd, Fe, P, Pb, Cr, Cu y Mn. De los elementos extraídos por DTPA cuatro de ocho presentan dependencia espacial (tres modelos Exponenciales y uno Gaussiano) siendo ésta fuerte en el caso del Mn y el Fe.

-RESUMO-

A sostiabilidade da produtividade agrícola e forestal depende das propiedades e da boa calidade do solo. O estudio da variabilidade das propiedades do solo resulta interesante, posto que realizando un manexo localizado do mesmo, favorécese a redución de custos de produción aproveitándose mellor as materias primas e o uso da maquinaria agrícola. A *agricultura de precisión* busca, mediante técnicas de aplicación localizada de fertilizantes, fitosanitarios e novos métodos de medida das propiedades dos solos, un maior rendemento económico da zona cultivada así como un menor impacto ambiental. Esta tese doutoral ten como obxectivo estudar a variabilidade estatística e espacial das propiedades xerais do solo e dos elementos extraídos nunha parcela representativa da Bisbarra de Terra Chá (ademais de crear mapas de variabilidade espacial dos mesmos). Ademais, estúdanse as posibles relacións entre a condutividade eléctrica aparente (CE_a) do solo, as propiedades xerais e os elementos extraídos. Relaciónanse tanto as propiedades xerais como os elementos extraídos coa condutividade eléctrica aparente (CE_a) do solo (horizontal e vertical). A toma de mostrax realizouse unha vez obtida a rede de mostraxe optimizada en función das medidas de CE_a . Obtivéronse 80 puntos de mostraxe a unha profundidade de 0 a 20 cm e >20 cm no Horizonte A. Nestes puntos foron amostradas as seguintes propiedades xerais: MO, pH, Ca, P, Mg, K, Al, H+Al, SB, CIC, V, arxila, limo e area. Os elementos foron extraídos nestes puntos mediante dous métodos, con Mehlich-3 (Ca, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Cr, Ni e Pb) e DTPA (Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Cr, Ni e Pb). Os coeficientes de variación das propiedades xerais ordénanse do seguinte xeito: $pH < CE_aH < ICC < MO < H+Al < CE_aV < SB < K < Ca < V < Al < Mg$; os elementos obtidos por Mehlich-3: $Fe < Ni < Cr < Cu < Cd < Pb < K < P < Ca < Zn < Mn$ e para os extraídos con DTPA: $Cd < Ni < Fe < Cu < Pb < Mn < Zn < Cr$. A CE_H presenta correlacións lineais altamente significativas coa MO (negativa), arxila, area (negativa), $P_{Mehlich-3}$ e Ni_{DTPA} e a CE_aV amosou correlación coa MO (negativa), Ca, P, SB, arxila, area (negativa), Fe_{DTPA} , Cd_{DTPA} , Ni_{DTPA} , Pb_{DTPA} , $Cd_{Mehlich-3}$, $Ni_{Mehlich-3}$ e $Pb_{Mehlich-3}$. A dependencia espacial da CE_aH y CE_aV é forte en ambos os casos, axustándose ao modelo esférico de semivariograma. Respecto ás propiedades xerais, 10 de 14 presentan dependencia espacial (cinco modelos esféricos e cinco exponenciais) sendo forte para MO, pH, P, arxila e area. Dos elementos extraídos por Mehlich-3 presentan dependencia espacial 10 de 11 (oito

modelos exponenciais e dous esféricos) sendo forte a dependencia para K, Cd, Fe, P, Pb, Cr, Cu e Mn. Dos elementos extraídos por DTPA catro de oito presentan dependencia espacial (tres modelos Exponenciais e un Gaussiano) sendo esta forte no caso do Mn e o Fe.

-SUMMARY-

Sustainable agricultural and forest production depends on soil properties and on soil quality status. Variability in soil properties has a big interest, because site specific management may allow a reduction of production costs, while fully exploiting raw materials and the use of agricultural machinery. Using techniques such as localized application of fertilizers, plant protection products and new methods for measuring soil properties, *precision agriculture* therefore seekd to increase economic return., while decreasing environmental impacts. The main objective of this doctoral was the analysis of the statistical and spatial variability of both general soil properties and extractable elements in a agricultural field tought to be representative of the conditions of the Terra Cha district; these also focuses on mapping the spatial variability of the soil variables studied. In addition potential relationships between soil apparent electrical conductivity soil general properties and extractable elements. In this way both, general soil properties and extractable elements are correlated with both soil veritcal and horizontal electrical conductivity (EC_a). Soil samples were taken in 80 positions within the study filed at 0-20 and >20 cm depth, covering the whole A Horizon. Soil samples wer analyzed for: OM content, pH, Ca, Mg, K, Al, H+Al, SB, CEC, V, clay, silt and sand. Extractions have been performed using two different methods, Mehlich-3 (Ca, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Cr, Ni y Pb) and DTPA (Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Cr, Ni y Pb). Coefficients of variation of general soil properties ranked as: $pH < EC_H < CEC < OM < H+Al < EC_V < SB < K < Ca < V < Al < Mg$. Moreover, coefficients of variation of elements extracted using Mehlich-3 ranked as: $pH < EC_H < CEC < OM < H+Al < EC_V < SB < K < Ca < V < Al < Mg$. When using DTPA, coefficients of variation ranked as: $Cd < Ni < Fe < Cu < Pb < Mn < Zn < Cr$. Significant lineal correlations have been found between EC_H to OM (negative), clay, sand (negative), $P_{Mehlich-3}$ and Ni_{DTPA} . In turn, EC_V was correlated to OM (negative), Ca, P, SB, clay, sand (negative) Fe_{DTPA} , Cd_{DTPA} , Ni_{DTPA} , Pb_{DTPA} , $Cd_{Mehlich-3}$, $Ni_{Mehlich-3}$ y $Pb_{Mehlich-3}$. Both EC_H and EC_V showed a strong spatial dependence, which was modelled by a semivariogram nugget effect plus a spherical component. Spatial dependence was also demonstrated by 10 out of the 14 soil properties studied and it was strong for OM, pH, P, clay and sand; in these cases, patterns of spatial dependence were modelled

by a nugget effect plus five spherical and five exponential semivariograms. When using Mehlich-3, 10 out of the 11 extracted elements showed spatial dependence, which was modelled by a nugget effect plus 8 exponential and 3 spherical models; the patterns of spatial dependence were stronger for K, Cd, Fe, P, Pb, Cr, Cu and Mn. When using DTPA, 4 out of the extracted elements also showed spatial dependence, which was modelled by three Exponential models and one Gaussian model; patterns of spatial were stronger for Mn and Fe.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 FORMACIÓN DEL SUELO

La acción de agentes atmosféricos (lluvia, viento, temperatura, etc.) y de los seres vivos (raíces de las plantas, bacterias, hongos, etc.), provocan en la roca madre a lo largo del tiempo una serie de transformaciones que conducen a la formación del suelo. Estos factores a través de distintos procesos, forman capas, horizontes, que desde el más superficial hasta el material originario generan el perfil edáfico (BADIA & MARTI, 1999).

La formación de un suelo se refiere a cambios de las propiedades del mismo que se producen con el tiempo en una dirección. Gran parte de estas transformaciones son lentas (VAN BREEMEN & BUURMAN, 1998). Las principales variables que determinan el estado de un suelo son la roca madre, el clima, los organismos vivos, la geomorfología y el tiempo (PORTA *et al.*, 1999). Los suelos se forman por una combinación de los distintos efectos que causan estos factores:

- La roca madre representa el inicio del sistema del suelo; es un elemento pasivo en la edafogénesis, es sobre quien los factores actúan y transforman. Dicho material puede ser una roca consolidada, un depósito no consolidado o bien un suelo preexistente (PORTA *et al.*, 1999). La influencia que tendrá este material original sobre el futuro suelo será observable en el color, la textura y la estructura del mismo; dependiendo de lo sensible que sea a la meteorización este material origen, de las características físicas y del régimen de humedad.

- El clima condiciona la humedad y la temperatura del suelo de forma directa y de forma indirecta tiene influencia en el desarrollo de la vegetación y organismos vivos. Influye en el proceso de meteorización (física y química), el proceso de

transporte y en el depósito de materiales (BADIA & MARTI, 1999). El efecto del clima es debido a las precipitaciones y la temperatura. Las precipitaciones afectan al desarrollo del suelo, esencialmente por la lixiviación. El material lixiviado generalmente comprende limo, arcillas, nutrientes además de otros compuestos. Las zonas con elevadas precipitaciones tienden a desarrollar más vegetación; por lo tanto los suelos de áreas húmedas tienen contenidos de materia orgánica superior a los de regiones secas (PLASTER, 2000). La temperatura, por su parte tiene importancia en las velocidades de reacción; de forma que las altas temperaturas aceleran los procesos. En áreas frías (como la tundra) los suelos se desarrollan de manera más lenta que en regiones cálidas (como en los trópicos), donde los suelos se desarrollan con rapidez.

■ Los organismos vivos que actúan directamente sobre el suelo son los microorganismos, plantas, animales e incluso el ser humano. Las plantas aportan materia orgánica, importante para la estructura, la aireación y circulación del agua. Actuando además como protectoras del suelo frente a la precipitación, afectando a la infiltración, escorrentías y erosión. Los animales mediante acciones como excavar, triturar y mezclar materiales del suelo, favorecen a estructurar a este. Los microorganismos son esenciales en los ciclos biológicos y químicos, del Carbono y del Nitrógeno; y además en la biodegradación de la materia orgánica (THOMPSON & TROEH, 1982; WHITE, 2000).

■ La geomorfología tiene una influencia también considerable. El relieve, ejerce una importante acción sobre la edafogénesis, puesto que provoca una modificación en el régimen hídrico (DUCHAUFOR, 1987). Los suelos que sufren una rápida erosión, permiten la formación de amplios valles, mientras

otros más resistentes dan lugar a vertientes escarpadas. La pendiente de las laderas, por otro lado, influye en la velocidad de erosión (THOMPSON & TROEH, 1982). El relieve así mismo, tiene influencia local en el clima. Los cambios de elevación del terreno afectan a la temperatura, de forma que cada 100 m que la altitud se incrementa la temperatura desciende aproximadamente 0.5°C (WHITE, 2000).

- El tiempo que los procesos de formación han actuado sobre un determinado suelo determina el estado de este. El tiempo necesario para la formación de un suelo oscila entre cientos, miles y millones de años (DUCHAUFOR, 1987), el proceso es lento, pero continuado.

El suelo en respuesta a su medio va transformándose; podemos hablar en general de que estos cambios están causados por cuatro procesos:

- Adiciones: Entrada en el sistema del suelo de diversos materiales como pueden ser: materia orgánica, aportes fluviales, volcánicos o químicos (contaminación del aire) (PLASTER, 2000).
- Eluviación: Pérdidas generalmente debidas a la lixiviación; migración de componentes del suelo por la acción de un agente químico. También existen pérdidas en el suelo debido a la erosión de la capa superficial, que puede afectar a la parte superior de un perfil y por ello a los horizontes subsuperficiales.
- Translocación: Movilización de los elementos del suelo y acumulación de los mismos. El desplazamiento puede ser en solución, y posteriormente seguido de una precipitación; o en suspensión, cuando el desplazamiento se produce en el agua que circula por el perfil (PORTA *et al.*, 1999).

■ Transformación: Alteración de materiales del suelo a distintas profundidades.

Estos procesos son comunes a la mayoría de los suelos. En función de otra serie de factores de formación o del clima existen otra gran variedad de procesos como pueden ser la *laterización* (formación de materiales ricos en óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio), *ferralitización*, *rubefacción*, etc.

1.2 SUELOS DE GALICIA

En la Comunidad Autónoma de Galicia las condiciones climáticas y el material de partida, predominantemente rocas ácidas, así como una vegetación natural que presenta especies acidificantes, favorecen la formación de horizontes úmbricos. El desarrollo de dichos horizontes, relativamente profundos con buen drenaje generalmente en los que se acumulan cantidades importantes de materia orgánica de acuerdo con los criterios de la FAO (1998), es generalmente rápido, comparado con otros horizontes como el cámbrico, espódico o árgico. Los horizontes úmbricos están presentes tanto en suelos jóvenes como en suelos más evolucionados (transformados bajo condiciones de alteración moderadas).

La principal característica de los Umbrisoles es la presencia de cantidades importantes de materia orgánica no saturada en la superficie del suelo. Esto en ausencia de actividad humana influye en la naturaleza físico-química de la solución del suelo y por tanto en el desarrollo del perfil. La materia orgánica no saturada puede estar formada por tipos de humus muy diferentes. El humus evoluciona en condiciones de actividad biológica baja, debido a las características ácidas del medio, la temperatura baja, humedad o al efecto combinado de estos factores. Los Umbrisoles se pueden relacionar con distintos grupos de suelos. Los límites los marca la ausencia de profundidad necesaria para que se forme el horizonte úmbrico, o bien por falta de otros horizontes como el cámbrico, espódico o propiedades gleicas o estágnicas. Por ello en teoría, los Umbrisoles podrían estar asociados a la mayor parte de los grupos de suelo. Si la profundidad del suelo es restringida o si el suelo no alcanza un desarrollo suficiente, los Umbrisoles limitarán con Leptosoles o Regosoles. Si la meteorización es suficientemente intensa para el desarrollo del horizonte cámbrico, se pasa a Cambisoles, que con el paso del tiempo, en un clima templado-húmedo, pueden evolucionar hasta formar Luvisoles. Intensas precipitaciones unido a la formación de un horizonte álbico subsuperficial asociado a un horizonte espódico

profundo llevaría a la aparición de un Podzol. En condiciones de hidromorfía creciente pudieran aparecer Gleisoles, e Histosoles en anaerobiosis.

Sin embargo, sobre ciertos materiales se pueden desarrollar suelos con un horizonte B árgico (B), caracterizado por iluviación de arcilla desde el horizonte superficial. Así en la Comunidad Autónoma de Galicia se han descrito suelos de tipo Alisoles, Luvisoles y Acrisoles que ocupan escasa extensión. Sobre rocas básicas o esquistos ricos en ferromagnesianos, pueden presentarse Ferrasoles cuya formación e latitudes como las de Galicia exigen periodos de uno a diez millones de años.

Los autores que han estudiado los suelos de Comunidad Autónoma de Galicia (GUITIÁN OJEA, 1967; GUITIÁN OJEA & DÍAZ-FIERROS, 1967; GUITIÁN OJEA, 1974; GUITIÁN OJEA *et al.*, 1981; GUITIÁN OJEA & CARBALLAS 1982; DÍAZ-FIERROS & GIL SOTRES, 1984; LÓPEZ *et al.*, 1984; MACÍAS *et al.*, 1978; MACÍAS VÁZQUEZ & CALVO DE ANTA, 2001) admiten que la naturaleza del material de partida en un contexto climático como el de Galicia, es el factor que permite explicar y agrupar más específicamente los tipos de suelos.

Las rocas que afloran en la Comunidad Autónoma de Galicia son fundamentalmente cristalinas, ígneas o metamórficas, aunque también existen enclaves sedimentarios terciarios y cuaternarios. Por otro lado muchos suelos se desarrollan sobre materiales previamente alterados o transportados, sobre los que se inicia una nueva edafogénesis. Las principales tipos de roca que debemos tener en cuenta, dada su influencia sobre las propiedades del suelo son:

- Pizarras y filitas: Se encuentran formando un conjunto de materiales de bajo grado de metamorfismo, más frecuentes en la parte oriental de Galicia. Están constituidas por rocas de diferentes composiciones, predominando minerales

poco alterables y de pequeño tamaño, como pueden ser cuarzo y clorita; apareciendo en el algún caso otros como sulfuros, carbonato, grafito, etc., cuyo comportamiento frente a la meteorización es distinto. Es frecuente la presencia de suelos de espesor escaso. La secuencia característica en el paisaje de filitas presenta Leptosoles, en cimas y en rebordes de ladera; Regosoles como consecuencia de acumulación de fragmentos rocosos situados en posición media y baja de la ladera; y Cambisoles húmicos o dístricos en zonas de mayor estabilidad. En el Horizonte A dominan mica-vermiculita y vermiculitas alumínicas; en el B y C halosita y caolinita, mientras que la presencia de gibbsita es poco frecuente. Estos suelos presentan una acidez entre 4.5-5 de pH, teniendo una elevada saturación (por el aluminio) del complejo de cambio y una fijación de fosfato media en el horizonte superficial.

- Rocas graníticas: Constituye el material geológico más abundante en Galicia, y existen diversos tipos según las características de los feldespatos y el contenido (y composición) de minerales micáceos (moscovita, biotita, etc.). La abundancia de minerales silicatados puede favorecer la aparición de un horizonte de alteración de textura arenosa sobre el que se asienta un Horizonte A úmbrico, considerándose Regosol úmbrico, de secuencia AC. Las distintas pendientes hacen que parezcan diferentes secuencias de suelo. En la fracción arcilla, son las micas degradadas a vermiculita, haloisita y geles alumínicos quienes dominan el Horizonte A. La gibbsita y haloisita-caolinita en los horizontes B_w y C. Estos suelos son de acidez similar a los anteriores (pH 4.5-5), presentando igualmente una elevada saturación el complejo de cambio por aluminio y una moderada – alta fijación de fosfatos en el horizonte superficial.

■ Rocas básicas: Son rocas ígneas y metamórficas cuyos tipos litológicos más importantes son los gabros, anfibolitas, granulitas y eclogitas, a los que se pueden añadir algunos gneises bajos. Se localizan en una mayor parte en la provincia de A Coruña, en el Complejo de A Capelada y afloramientos de Monte Castelo, Melide, Lalín, Santiago entre otros. Estas rocas se alteran sin dificultad, dando lugar a suaves paisajes, donde es común que se formen suelos evolucionados y profundos; que presentan propiedades ferráticas asociadas a arcillas de baja actividad y oxi-hidróxidos de Fe. Los suelos más representativos de las áreas con roca básica tienen un horizonte B_w Cámbico de formación actual o relictas, y en pequeñas superficies apenas afectadas por procesos erosivos se llega a formar un horizonte ferrático B_{ws} . Una secuencia de suelos típicos sobre rocas básicas puede incluir la aparición puntual de Leptosoles en zonas de ladera, al igual que Andosoles, debido a la alta alterabilidad de fragmentos de roca fresca. En la zona más típica de pendientes medias y bajas, con escaso riesgo de erosión, se forman Cambisoles húmicos y ferráticos que eventualmente pueden presentar pequeñas inclusiones de Ferralsoles. La fracción de arcilla está relacionada con el carácter policíclico que permite establecer una gran diferencia entre una parte superficial renovada y con propiedades ándicas y otra subsuperficial formada por horizontes fuertemente evolucionados. Este hecho indica que sobre rocas básicas puede presentarse una inversión de la secuencia normal de suelos, así los materiales jóvenes y menos evolucionados se encontrarían en superficie, mientras que los más antiguos, aparecerían en la parte inferior del perfil. En los horizontes A y B_w del ciclo superior se encuentran arcillas de bajo grado de orden y materiales como haloisitas esferoidales, imogolita y complejos órgano-alumínicos. En los horizontes B_w y B_{ws} del ciclo inferior domina una mezcla de caolinita y guetita.

Desde el punto de vista químico estos suelos tienen una acidez moderada (pH 4.8-5.5) y también una moderada saturación de aluminio en el complejo de cambio. Los horizontes rejuvenecidos presentan un déficit no muy importante en Ca, Mg y K. En profundidad se aprecia una mayor falta de nutrientes y saturación por aluminio. El carácter ándico provoca una elevada fijación del fosfato.

■ Serpentinitas: Son rocas cuya característica principal es que tienen un importante enriquecimiento de magnesio, lo cual provoca la formación de minerales como el talco, crisolito y anfíbol. Además suelen abundar los metales pesados (Cr, Ni, Mn, Cu y Fe) en diferentes combinaciones, formando parte de la estructura de silicatos, óxidos o carbonatos. Este alto contenido en magnesio favorece la aparición de horizontes superficiales A de tipo móllico. Los suelos más jóvenes corresponden a un Leptosol móllico y en etapas posteriores se forma un horizonte B que da lugar a un Phaeozem háplico cuyo complejo de cambio es dominado completamente por el magnesio. Si con el paso del tiempo el horizonte superficial evoluciona a un A úmbrico por acidificación y lavado de cationes, el suelo pasa a ser un Regosol úmbrico o un Cambiosil húmico. En áreas hidromórficas se puede desarrollar un Cambisol gleico, un Gleicol úmbrico e incluso un Histosol. La evolución edáfica de las serpentinitas está condicionada por la composición del material de partida. En primer lugar, las serpentinitas suelen contener niveles muy bajos de sodio y potasio, lo que en condiciones naturales limita el desarrollo vegetal en gran medida. Además el alto contenido en magnesio debido a la anómala relación Ca-Mg, dificulta la absorción del calcio por las plantas. Evidentemente el exceso de metales pesados en ciertos casos, puede provocar un crecimiento desfavorable de la

cobertura vegetal. Los suelos que se desarrollan sobre estas rocas por lo tanto, suelen ser especialmente infértiles.

- Esquistos: En este grupo se incluyen materiales con metamorfismo de bajo grado que pertenecen a dos grandes conjuntos, y que ocupan una gran extensión en el centro y centro-sur de la Comunidad Autónoma de Galicia. Son ricos en minerales micáceos; con contenidos bajos en cuarzo y formado por biotita, clorita y minerales fácilmente alterables para el primer grupo (denominado Complejo de Órdenes); mientras que el segundo grupo destaca por sus contenidos en moscovita, cuarzo y feldespato potásico. Los suelos derivados de la formación más extensa, la de los esquistos del Complejo de Órdenes, no difieren en gran medida de los desarrollados sobre rocas básicas; si bien son menos alterables y tanto el carácter ándico de los horizontes superficiales como el ferrálico de los horizontes más profundos son menos perceptibles. En zonas con pendiente limitada, el suelo más representativo es el Cambisol húmico y en los suelos cultivados la pérdida de coloración, espesor y materia orgánica pueden originar un horizonte ócrico, siendo el suelo resultante un Cambisol dístico; en las zonas hidromorfas se reconocen inclusiones de Cambisoles gleicos y Gleisoles húmicos. Los esquistos ricos en moscovita tienen una velocidad de alteración menor a los anteriores, dando lugar a suelos menos evolucionados que no llegan a alcanzar propiedades ferrálicas. Sobre esquistos moscovíticos también se desarrolla como suelo más característico un Cambisol húmico, si bien más frecuentemente aparecen Leptosoles y Regosoles. La mineralogía de la fracción de arcilla de horizontes superficiales está caracterizada por la presencia de materiales de bajo grado de orden interlamina mica-vermiculita e incluso vermiculitas cuya degradación se ha

relacionado con la acidez del suelo. En los horizontes B_w subsuperficiales se aprecia un contenido importante de minerales caoliníticos junto a guetita, cuyo contenido aumenta con la evolución. Las propiedades químicas de suelos desarrollados sobre esquistos en Galicia son por lo general intermedias entre las de suelo sobre granito y las básicas tanto para la acidez (pH 4.7-5.0), porcentaje de aluminio de cambio y déficit de elementos tales como K, Mg, Ca y P. En general, los niveles de fertilidad son más elevados en los suelos desarrollados sobre materiales del Complejo de Órdenes que de los derivados de esquistos cuarzosos y moscovíticos.

- Rocas carbonatadas: Incluye este grupo calizas, dolomías y magnesitas que ocupan extensiones reducidas en Orense y Lugo, intercaladas entre pizarras de origen paleozoico. Es característico de ellas, que no siempre afloran en superficie, e incluso cuando si lo hacen, gran parte del material edáfico se constituye de coluviones compuestos de materiales pizarrosos o cuarcíticos en los que se enmarcan. El espesor de suelo es escaso, y en cuanto a su evolución sigue la secuencia Leptosol rendsico y móllico a Phaeozem calcáreo o háplico según sea la profundidad del horizonte superficial. La descarbonatación creciente provoca que el perfil pase a Regosol eútrico y en un estado más avanzado las arcillas pueden dispersarse y moverse en profundidad dando suelos de tipo Luvisol crómico o háplico. Cuando hay mezcla de materiales pizarrosos o predominan los mismos, el suelo tiende a evolucionar hacia un Cambisol eútrico, húmico o dístico. Desde el punto de vista químico el suelo es rico en calcio, con pH elevado, cerca de la neutralidad, y un complejo de cambio saturado y rico en calcio causante de la formación de un horizonte móllico.

■ Sedimentos: En este grupo se incluyen sedimentos terciarios y cuaternarios que ocupan una importante extensión, y están asociados a depresiones tectónicas (Terra Chá, Monforte, A Limia, As Pontes, Sarria, etc.) o a la desembocadura de los ríos. Sobre estos sedimentos se forman suelos de tipo muy variable. Considerando sedimentos recientes, localizados en los depósitos fluviales, dan lugar a suelos con escaso grado de diferenciación, como Fluvisoles; los depósitos eólicos costeros derivan los Arenosoles. Los Fluvisoles calcáreos o tiónicos son relativamente extensos en los estuarios. Los sedimentos del cuaternario medio y antiguo están representados por antiguas terrazas y depósitos torrenciales con frecuencia pedregosos. Aparece sobre estos sedimentos un horizonte B_t de origen aluvial, que puede dar lugar a Luvisoles, Alisoles y Acrisoles. Los materiales terciarios presentan potentes capas en las depresiones tectónicas en las que predominan los materiales finos y arcillas caolínicas, que pueden presentar capas de lignito intercaladas. En los bordes de las cuencas o cuando el depósito cuaternario ha sido eliminado, los sedimentos terciarios constituyen materiales de partida sobre los que, con frecuencia, se desarrollan Gleisoles húmicos o dísticos, favorecido por un elevado nivel freático.

Los materiales de partida más abundantes en Galicia son las rocas ígneas y metamórficas, si bien existe una gran variedad de materiales geológicos de partida. Es un factor de gran importancia para dilucidar la formación del suelo en un contexto climático como el de la Comunidad Autónoma de Galicia, puesto que la naturaleza del material de partida se utiliza con frecuencia para explicar (y agrupar) de forma más adecuada los distintos tipos de suelo.

1.3 AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Los productores agrícolas necesitan explotar de forma eficiente sus parcelas con el objetivo de obtener la mayor rentabilidad posible optimizando los insumos. La evolución tecnológica, permite que el sector agrario pueda beneficiarse de sistemas útiles para aplicarlos en las distintas explotaciones. Estas técnicas que ayudan a los productores en el manejo de su explotación han de adecuarse a las posibilidades de cada parcela, según las características del cultivo, el terreno disponible, y los costes que puedan abordarse. La adopción de estas nuevas técnicas viene justificada por una obtención de mayor rendimiento de la explotación con menores costes de manera muy clara. El factor clave por el que es necesario un tratamiento distinto del tradicional estriba en la existencia de *variabilidad* dentro de la parcela de cultivo. Gracias a las nuevas tecnologías, se ha podido comprobar mediante análisis (de suelo, planta, agua de riego...) que la parcela no es uniforme, no se comporta de la misma forma en todos los puntos de su extensión. El tratamiento de esa variabilidad es de lo que se ocupa la *agricultura de precisión*.

La *agricultura de precisión* es la utilización y aplicación de las nuevas tecnologías a pequeñas unidades de superficie; teniendo en cuenta la diversidad del suelo, el entorno ambiental y las necesidades de las plantas con el fin de gestionar y optimizar la aplicación de insumos (semillas, fertilizantes, fitosanitarios, riego...) para obtener una producción rentable, de calidad y respetuosa con el medio ambiente (PÉREZ DE CIRIZA, 2001). Se considera que la *agricultura de precisión* es la forma más viable para la consecución de una agricultura más eficiente y sostenible (CORWIN *et al.*, 1999). En la *agricultura de precisión* se utilizan un conjunto de técnicas que permiten dar un tratamiento agrícola diferenciado a cada lugar de una parcela de cultivo en función de las características agronómicas del mismo. La *agricultura de precisión* proporciona la capacidad de recopilar, interpretar y aplicar información específica de las explotaciones, transformando datos e información en

conocimiento y rentabilidad. Estos sistemas además permiten aumentar la precisión de las labores y la eficiencia de los equipos (KREIMER, 2003).

El abonado, la siembra y los tratamientos fitosanitarios a dosis variable, la sectorización de los riegos, de las variedades, de los patrones o, incluso, la determinación de la rentabilidad zonal de los cultivos y la gestión de la trazabilidad de los mismos son algunas de sus múltiples aplicaciones. Es un área en continua evolución a medida que la tecnología sigue avanzando, surgiendo nuevas aplicaciones en las que la investigación es imprescindible a fin de adaptarlas a la problemática específica del entorno agrícola de cada lugar. Una buena denominación de estas técnicas es la de “Site-Specific Farming” o “Site-Specific Agriculture”, que en definitiva consiste en dar un tratamiento determinado en cada sitio concreto (o específico). Desde el inicio de la agricultura, los agricultores que concibieron la parcela agrícola como una porción de terreno de características más o menos homogéneas en toda su extensión, dedicando cada zona al uso que consideraban más adecuado. En este sentido, incluso las unidades de superficie hacían referencia a la capacidad de trabajo del agricultor (fanega de puño, fanega de marco, etc.) en función de los medios de que disponía. Con el nacimiento de la mecanización agraria, es cuando surge la posibilidad de aumentar la superficie de cultivo (y así aprovechar al completo lo que los nuevos equipos ofrecen). La agrupación de zonas de manejo homogéneas en parcelas mayores provoca un aumento en la variabilidad; y por lo tanto pérdida de *precisión* en las labores agrícolas. De la aparición de las nuevas tecnologías de la informática y de las comunicaciones surgen los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), lo cual provoca un gran aumento en las aplicaciones agrícolas. La implantación de las técnicas de *agricultura de precisión* depende de las ventajas que aporten al agricultor. Por ejemplo, la mejoras en la sostenibilidad medioambiental, en el rendimiento económico y de la gestión de la extensión cultivada. La *agricultura de precisión* permite disminuir de forma acentuada el impacto ambiental de la actividad agraria al

facilitar una distribución racional de los insumos, reduciendo la contaminación del medio natural ya que minimiza los excesos en la utilización de productos químicos, tanto fertilizantes como plaguicidas (esta reducción de insumos de procedencia industrial conlleva un ahorro energético en la producción, transporte y la distribución). Existen múltiples aplicaciones a utilizar, desde la aplicación de abonos a dosis variable, el uso de sensores remotos para la detección de carencias en el cultivo o el uso de sensores de vegetación cercanos que permitan la determinación y tratamiento en tiempo real de las necesidades nutritivas del cultivo y también los tratamientos fitosanitarios o herbicidas.

La *agricultura de precisión* según SCHUELLER (2000) se divide en:

- Monitorización (recogida y almacenamiento de datos).
- Manejo (toma de decisión).
- Control (gestión y manipulación de la información).

La monitorización es el que más influye sobre los resultados, pues todas las informaciones adquiridas en esta fase permiten la utilización de tecnologías geoespaciales para la determinación de la variabilidad espacial y posterior determinación de las llamadas “zonas de manejo” y de las estrategias de gestión. Las tecnologías geoespaciales favorecen la elaboración de mapas y interpretación de las propiedades del suelo y planta; y es justamente en esta etapa, cuando se busca que el proceso de muestreo del suelo sea lo más eficiente y económico posible, pues en la *agricultura de precisión* los costes de los muestreos de suelo son altos (lo cual dificulta su difusión para la mayor parte de los agricultores).

En los inicios de la *agricultura de precisión* la recogida de la información necesaria para evaluar la variabilidad espacial de una parcela pasaba, casi obligatoriamente, por la obtención de mapas de cosecha, de forma que, a medida que se tenía una serie temporal más larga de los mismos, se alcanzaba mayor exactitud en las estimaciones. Desde la

aparición de equipos comerciales de medición en campo de la conductividad eléctrica aparente (CE_a) de los suelos esto no es tan necesario, porque su uso como herramienta de evaluación de la variabilidad espacial de las propiedades físico-químicas de los suelos, al tratarse de una medida que puede hacerse antes de la implantación de un cultivo, supone un acortamiento importante del periodo de decisiones por parte del agricultor, pudiendo éste empezar a realizar la siembra o la fertilización a dosis variable de forma inmediata. (TERRÓN LÓPEZ, 2013).

Con el fin de caracterizar la variabilidad espacial de las principales propiedades físicas y químicas del suelo y emplear esa información para determinar las zonas de manejo potenciales, sería deseable la propuesta de diferentes técnicas para considerar las diversas fuentes de información de las que se puede disponer. Por ello, es necesario comprobar si el uso de diversas técnicas geoestadísticas, acompañadas de otros métodos de integración de la información, como son el análisis de los componentes principales, pueden constituir unas herramientas importantes en el ámbito de la *agricultura de precisión*.

1.4 ESTADÍSTICA & GEOESTADÍSTICA

Las medidas de posición: media, la mediana, la moda, máximo y mínimo, asimetría y curtosis, permite conocer la dispersión de los datos y nos permiten conocer si los datos pertenecen a una misma población (SIQUEIRA *et al.*, 2008a,b); por otro lado las medidas de dispersión: desviación estándar y el coeficiente variación nos dan información de la variabilidad de los datos obtenidos. La información que se obtiene de las medidas de posición nos permite deducir si en el conjunto de datos obtenidos existen datos anómalos (valores extremos). Estos valores extremos modifican sensiblemente la distribución de los datos, siendo los valores de asimetría y curtosis los más sensibles a su presencia. La asimetría y la curtosis nos permiten conocer si la distribución de frecuencias se acerca a una distribución normal (Gaussiana), esto ocurrirá si toman valores 0 y 3, respectivamente; se admite de modo práctico que una distribución de frecuencia está cerca de la normalidad cuando el coeficiente de asimetría es menor a 1 (PAZ-GONZÁLEZ *et al.*, 1996). Además la representación gráfica de los histogramas de las distribuciones de frecuencia nos ayudan a conocer la intuitivamente si distribución de los datos es normal.

El análisis estadístico de los datos se llevo a cabo mediante el software IBM SPSS (2009) con el que se calcularon los principales momentos estadísticos: media, mediana, moda, desviación estándar, asimetría, curtosis, máximo, mínimo y coeficiente de variación. Se realizaron además el cálculo y representación de las frecuencias de cada propiedad estudiada.

Se han realizado correlaciones bivariantes entre las diferentes propiedades y elementos del suelo estudiado con el fin de ver las relaciones que presentan entre sí. Por otro lado se ha realizado un análisis de componentes principales, una técnica multivariante, que presenta una doble utilidad:

A) Permite representar óptimamente en un espacio de pequeña dimensión observaciones de un espacio general p -dimensional. Nos permite identificar posibles variables *latentes* o no observadas que generan los datos.

B) Permite transformar las variables originales, en general correlacionadas, en otras nuevas variables no correlacionadas, facilitando la interpretación de los datos.

Es importante resaltar el hecho de que el concepto de mayor información se relaciona con el de mayor variabilidad o varianza. Cuanto mayor sea la variabilidad de los datos (varianza) se considera que existe mayor información, lo cual está relacionado con el concepto de entropía. Esta perspectiva fue introducido en las ciencias del suelo por BURROUGH & WEBSTER en 1976; más recientemente se ha utilizado para resumir grandes series de datos recogidos para estudiar la calidad del suelo (WANDER & BOLLERO, 1999; MADDONNI *et al.*, 1999). Puede realizarse un mapa mediante *kriging* con el valor de un componente principal en un punto, de la misma forma que cuando se toman valores en un punto de un elemento estudiado (GOOVAERTS, 1997).

La variabilidad espacial constituye una característica fundamental si se quiere describir y analizar una gran parte de los fenómenos naturales. La variabilidad muestra una componente aparentemente errática que no permite estudiarla de manera adecuada mediante la estadística clásica (el cálculo de las frecuencias de distribución no tiene en cuenta la distancia a la que fueron recogidas las muestras en campo); es necesario utilizar técnicas Geoestadísticas para poder llevar a cabo un análisis adecuado. La variación continua de las propiedades del suelo hace que los muestreos efectuados en puntos vecinos no sean independientes en sentido estadístico, es decir que exista una dependencia espacial hace necesario la aplicación de la Geoestadística. La Geoestadística fue definida por JOURNEL (1986) como la rama de la Estadística dedicada a analizar los procesos

distribuidos espacialmente. La Geoestadística tiene su campo de aplicación en el análisis de datos distribuidos en el espacio de forma irregular (SAMPER & CARRERA, 1990) y permite la estimación de valores en un punto a partir de los datos observados y la realización de cartografía automática (BALAIRÓN RUIZ, 1995).

En Sudáfrica, en el año 1951 DANIEL G. KRIGE, estudiando datos de concentración de oro, concluye que si no tenía en cuenta la localización espacial y la separación entre las muestras, no encontraba sentido a la varianza de los datos. A partir de esta observación, MATHERON (1963, 1971) desarrolla la *Teoría de la Variable Regionalizada*, en la que se fundamenta la Geoestadística. MATHERON (1963) define una variable regionalizada como una función espacial numérica, que varía de un lugar a otro, con continuidad aparente, y cuya variación no puede ser representada por una función matemática simple. Esa continuidad espacial puede ser estimada a través del semivariograma. La importancia económica de las nuevas teorías en la minería, prospección minera y evaluación de reservas hizo posible que se avanzase mucho en este campo.

Posteriormente la Geoestadística se aplicó a diferentes campos como Hidrología, Edafología, Agronomía, Climatología, etc. Una variable regionalizada es una variable distribuida en el espacio que se puede utilizar para describir fenómenos naturales. Tiene dos aspectos diferenciados, un *carácter aleatorio*, que se asocia a las variaciones impredecibles de la variable y un *carácter estructurado*, relacionado con cada fenómeno estudiado o regionalización y caracterizado por la función semivariograma.

Una de las principales utilidades de la Geoestadística, es la estimación, a partir de un conjunto de medidas, de una variable de puntos, o áreas en los que no se dispone de información, además de obtener la estimación se consigue una medida de la incertidumbre existente en dicha estimación; la mayor parte de los datos tienen una componente espacial asociada, siendo por lo general más semejantes entre sí los más cercanos en el espacio

respecto a los más alejados. Este proceso es un método de interpolación denominado *kriging*, que estima los valores de la propiedad estudiada en los puntos no muestreados, con varianza mínima y de forma no sesgada; siendo por tanto un óptimo interpolador (BURGESS & WEBSTER, 1980). La minimización del error se realiza sobre la base del conocimiento exacto del *semivariograma*. Cuando se considera que la componente espacial es importante en la modelización y el análisis de información, se hace necesario una aproximación estadística distinta a la tradicionalmente utilizada: el *semivariograma* (VIEIRA *et al.*, 1983). El *kriging* utiliza la dependencia espacial entre muestras vecinas expresadas por el *semivariograma* para estimar valores en cualquier posición dentro del área de estudio (VIEIRA, 2000).

La Geoestadística permite además, el estudio de la dependencia espacial entre dos propiedades correlacionadas utilizando el *semivariograma cruzado* y estimar mediante el método del *cokriging* el valor de una propiedad en función de la otra. Esto se engloba en lo que se denomina la Geoestadística multivariada; el *cokriging* estima una variable principal muestreada en un número reducido de puntos utilizando otra variable secundaria (con la cual se haya correlacionada fuertemente) muestreada en un mayor número de puntos (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978; VIEIRA, 2000).

A partir de los datos que han sido estimados pueden crearse mapas de isolíneas muy precisos, la densidad de los datos será mayor y se pueden determinar los intervalos de confianza (de los mapas) mediante la varianza de estimación (VIEIRA, 2000). El análisis utilizando métodos geoestadísticos y el realizado mediante la Estadística clásica, no tienen que ser excluyentes, sino complementarios (GONZÁLEZ GARCÍA, 1998). Si se está realizando un estudio de una propiedad determinada del suelo, puede hacerse un estudio estadístico preliminar y a continuación utilizar la Geoestadística para la interpolación de los datos en puntos no muestreados.

1.5 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE DEL SUELO

La aplicación de métodos geofísicos, habitual en Geología, se ha ido generalizando en Ciencias del Suelo, sobre todo desde la década de 1990. La principal ventaja de dichos métodos consiste en que no son destructivos y además, con frecuencia permiten obtener medidas en continuo a lo largo de perfiles. La medida de la conductividad eléctrica aparente (CE_a) por inducción electromagnética es, tal vez el método más empleado y ha permitido evaluar indirectamente numerosas propiedades del suelo, siendo ampliamente usada para caracterizar la variabilidad del suelo en *agricultura de precisión* (CORWIN & LESCH, 2005; ALLRED *et al.*, 2008). Otras técnicas cada vez más usadas son la tomografía de resistividad eléctrica (TRE), la resonancia magnética nuclear, el georadar, las ondas sísmicas, la gravimetría, etc.

Particular atención merece la tomografía de resistividad eléctrica (TRE) en 2 y 3 dimensiones (2D y 3D) que ha implementado para aplicaciones tales como la caracterización de la estructura y heterogeneidad vertical y horizontal del suelo, el seguimiento del transporte de agua, la delimitación de intrusiones salinas, etc. (SAMOUËLIAN *et al.*, 2005). Entre las ventajas de esta técnica se puede señalar que permite analizar la variabilidad espacial y temporal a diversas escalas, desde intervalos del orden del centímetro a varios cientos de metros y para diferentes profundidades, así como la notable sensibilidad de la medida (p.e. LELOY *et al.*, 2001; SAMOUËLIAN *et al.*, 2005; ALLRED *et al.*, 2008). Esta técnica ha sido usada también para caracterizar transectos en la parcela objeto de esta tesis doctoral, (VALCÁRCEL *et al.*, 2013).

Por tanto la variable geofísica de referencia empleada en esta tesis para el estudio de la variabilidad espacial del suelo ha sido la conductividad eléctrica aparente (CE_a). La conductividad eléctrica (CE) es la facultad que posee un material de transmitir o conducir la

corriente eléctrica (MC NEILL, 1992). La conductividad eléctrica aparente (CE_a) del suelo es la capacidad del suelo de transmitir una corriente eléctrica; y es distinta a la conductividad eléctrica (CE_e) del suelo del extracto de saturación, que se utiliza como indicador de las sales disueltas presentes en un suelo.

COOK & WALKER (1992) definieron la CE_a como la media ponderada en profundidad de la conductividad eléctrica global del suelo. En otras palabras, es la conductividad eléctrica media integrada entre diferentes profundidades del suelo; la profundidad va a depender del instrumento usado en la medición.

La (CE_a) se encuentra afectada por la combinación de propiedades físico-químicas, incluyendo sales solubles, contenido de arcilla y su mineralogía, contenido de agua de suelo, densidad del suelo, materia orgánica y temperatura de suelo. Por ello, la medida de la CE_a ha sido usada a nivel de campo para delimitar la variación espacial de varias propiedad edáficas, como salinidad de suelo, contenido de arcilla o profundidad a capas ricas en arcilla, contenido de agua del suelo, profundidad de sedimentación de arenas y materia orgánica (CORWIN & LESCH, 2005a). Desde su uso inicial para medir la salinidad de suelo, la aplicación agrícola de CE_a ha evolucionado, siendo un medio de establecer la variación espacial de las principales propiedades físico-químicas del suelo que afectan a la misma. La medida de CE_a del suelo es un método rápido, fiable y accesible, y sus valores, están con frecuencia, relacionados con la producción del cultivo. Por ello, su medida es una de las herramientas usadas con más frecuencia para la caracterización espacio-temporal de propiedades edáficas y antropogénicas de suelo (CORWIN & LESCH, 2005a). CORWIN & LESCH (2005b) obtuvieron una alta correlación entre CE_a y algunas propiedades del extracto de saturación de suelo (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ y Mg^{2+}), Na^+ intercambiable y la relación de adsorción de sodio.

SUDDUTH *et al.* (2005) demostraron que las correlaciones de la CE_a con el contenido de arcilla y la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.) eran generalmente altas en todas las parcelas estudiadas; también obtuvieron que otras propiedades del suelo, como la humedad y los contenidos de limo, arena y carbono orgánico, estaban altamente relacionadas con la CE_a en algunas parcelas de estudio. En 2009 SIQUEIRA describe en la comarca de Terra Chá (Lugo), correlaciones lineales entre la CE_a y las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

ANDERSON-COOK *et al.* (2002) dedujeron que la CE_a del suelo medida con métodos de inducción electromagnética, por sí misma, puede ser usada para clasificar el suelo en amplias categorías con una precisión aproximada del 85 %, y, si se combina con datos de producción del cultivo la precisión de la clasificación aumenta al 90 %.

La CE_a del suelo es un método de muestreo rápido, que favorece la obtención de datos sobre el suelo y la distribución espacial de las propiedades con las que está relacionada. La clasificación del suelo usando la CE_a permite una base de datos efectiva para la delimitación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y que desempeñan un papel importante en los procesos de producción agraria y de conservación ambiental. De esta manera, estos datos son esenciales para la monitorización temporal del estado del suelo, y para una implementación de los procesos de gestión (JOHNSON *et al.*, 2001).

Según FRAISSE *et al.* (2001), el rendimiento potencial de un cultivo está altamente relacionado con la cantidad de agua disponible para las plantas. Así, su variabilidad puede ser aproximada sobre la base de las principales propiedades físicas del suelo y la topografía. La CE_a resulta un excelente indicador de este parámetro al tener una proporcionalidad directa con el contenido de humedad del suelo en suelos no salinos.

Actualmente se usan dos técnicas principales para medir la CE_a del suelo en el campo: un método electromagnético (*inducción electromagnética*) y otro eléctrico (*de contacto*).

Ambos métodos producen resultados equivalentes. El primer método se lleva a cabo introduciendo ondas electromagnéticas en los materiales del suelo a partir de una fuente que se desplaza sin hacer contacto físico con el suelo. Un sensor en el aparato mide el campo electromagnético resultante inducido. La potencia del campo electromagnético secundario es directamente proporcional a la conductividad eléctrica del suelo. El método eléctrico emplea aparatos que introducen corriente eléctrica en el suelo por medio de dos electrodos metálicos enterrados algunos centímetros en la superficie del suelo. Luego se mide directamente la caída de voltaje entre otros dos electrodos. La conductividad eléctrica se obtiene por la relación entre corriente-voltaje, y con el factor geométrico del esquema utilizado en la medida.

1.6 OBJETIVOS

Este trabajo tiene como principales objetivos:

- Estudiar la variabilidad estadística de las propiedades generales del suelo y de los elementos extraídos con DTPA y Mehlich-3 en una parcela de 10 Ha, representativa de la comarca de Terra Chá (Lugo) a partir de una red de muestreo optimizado.
- Relacionar la conductividad eléctrica aparente (CE_a) del suelo con las propiedades generales del mismo y los elementos extraídos con DTPA y Mehlich-3.
- Evaluar la variabilidad espacial y cartografiar las propiedades generales del suelo y los elementos extraídos con DTPA y Mehlich-3 mediante el análisis geoestadístico.
- Comparar los resultados de los análisis estadístico y geoestadístico en dos capas del Horizonte A de parcela estudiada.

CAPÍTULO 2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE_a) MUESTREO OPTIMIZADO & TOPOGRAFÍA DE LA PARCELA ESTUDIADA

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

Se ha estudiado la variabilidad espacial del suelo en una parcela que está localizado en la Comarca de Terra Chá (Figura 2.1), en la zona interior al nordeste de Lugo (Galicia, España).

2.1.1 La Comarca de Terra Chá

La comarca de Terra Chá es la más extensa de Galicia, ocupando una extensión de 1624 km² (TRAGSA, 2009), estando delimitada en sus bordes por relieves montañosos y recorrida en su interior por una densa red de recursos fluviales. La comarca es una región de débiles contrastes topográficos, con una altitud media de 420 m, drenada por el Miño y por los afluentes que descienden de las sierras o de los relieves marginales.

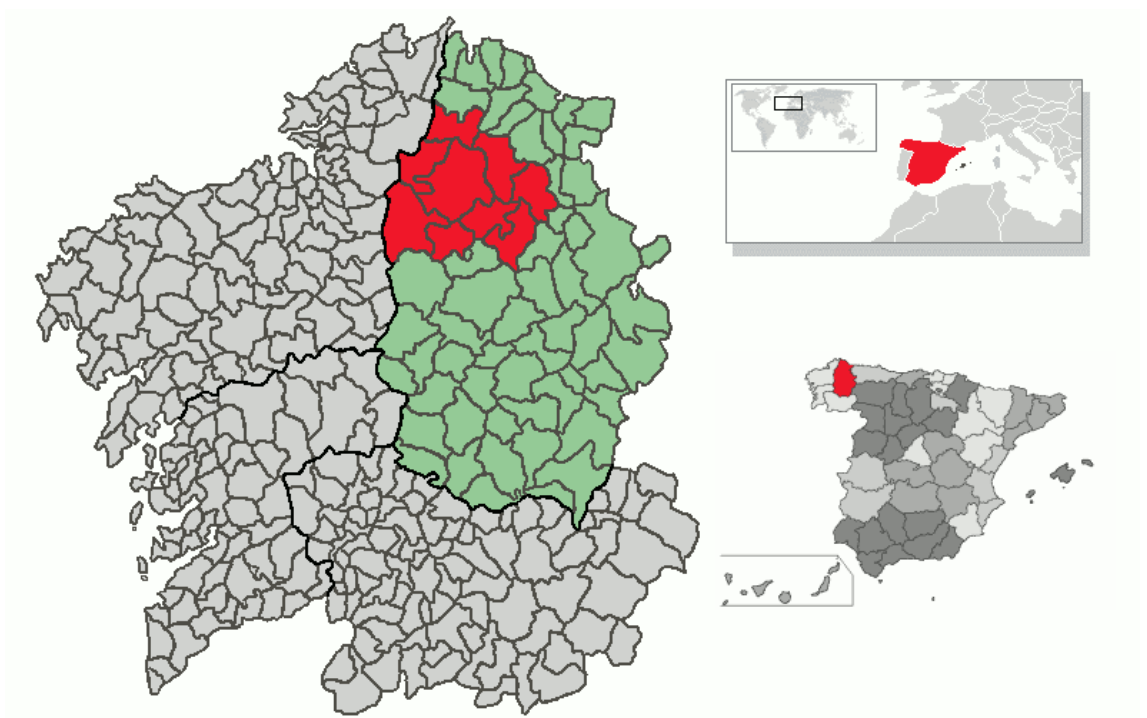


Figura 2.1.- Mapa de situación de Terra Chá.

El marco geológico de la comarca está formado por los materiales que forman la llamada Unidad del Domo de Lugo, materiales que pueden ser de origen Precámbrico o Cámbrico.

El Precámbrico de esta unidad se dividió cartográficamente en dos partes: superior, o serie de Villalba, e inferior, o serie de Alba; perteneciendo ambas series a un mismo conjunto.

La granodiorita tardía es la única roca ígnea que aparece formando parte del marco de la cuenca. Esta granodiorita con megacristales intruye en materiales precámbricos y paleozoicos con una dirección que se va adaptando a la forma del contacto.

La Comarca de la Terra Chá está situada en una de las líneas de depresión señaladas por HERNANDEZ PACHECO (1934) y DANTÍN CERECEDA (1912), las cuales coinciden con largas dislocaciones que se pueden señalar en el macizo galaico. Esta línea de depresiones, jalonada por depósitos terciarios y cuaternarios, discurre por la Tierra de Lemos, Lugo y la Comarca de Terra Chá; llegando hasta el valle de Masma y Foz.

Su superficie se levanta progresivamente cara al sur, siendo este basculamiento de dirección N-S, posterior a su peneplanización, a lo largo del Mioceno, debiendo afectar de una manera muy importante a la red hidrográfica de la región. Aparecen depósitos terciarios y cuaternarios sedimentados sobre el sustrato primario. Los materiales más antiguos son los conglomerados finos, arenas, arcillas muy semejantes a los depósitos miocenos de la meseta, que algunas veces están inclinados hasta un 30% y, generalmente, están hundidos en las depresiones tectónicas, lo cual acredita la existencia de movimientos orogénicos de cierta importancia, posteriores a su sedimentación. Estos sedimentos están cubiertos por depósitos más modernos, discordantes con los anteriores, formados por conglomerados gruesos, poco rodados y cimentados por arcillas rojas. Encajados en estos depósitos hay otros más recientes que forman terrazas a varios niveles, claramente cuaternarios.

La cuenca terciaria que configura la Comarca de Terra Chá está formada por sedimentos detríticos finos del Mioceno Superior, de una potencia máxima de 100-150 m (datos obtenidos de los SEV realizados por el IGME entre los años 1980-1982). Esta potencia máxima se localiza al norte de la cuenca, mientras que al bajar cara al sur, el espesor del sedimento se adelgaza progresivamente hasta llegar a los 25-30 m. En dirección oeste-este, la profundidad varía entre 10 y 40 m en el centro de la cuenca.

Los sedimentos existentes en la cuenca se presentan en capas alternantes de materiales más o menos arcillosos y arenosos, con notables cambios laterales de facies, que presentaría tres tramos: de naturaleza arcillosa en la base, orgánica en el primer tramo y alternante de arena y arcilla en el segundo y de una mezcla de conglomerados y arena en el superior (GARCIA AGUILAR, 1987).

Las capas con mayor porcentaje de finos, originan situaciones de hidromorfía cuando la topografía es de poca o nula pendiente (CASTELAO & DIAZ-FIERROS, 1992).

CASTELAO & DIAZ-FIERROS, (1992) describen que el 68% de los suelos de la Comarca de Terra Chá son clasificados como Cambisoles encontrados en zonas con hidromorfía con mayor pendiente, el 22% Gleisoles descritos en zonas con mayor pendiente y el 10% Fluvisoles.

CANCELA BARRIO (2004), sostiene que los Cambisoles de la Comarca de Terra Chá presentan unas características muy variables y por lo general tienen una calidad agrícola media en función de otras posibles propiedades que puedan tener, o del clima. Vienen asociados a propiedades gleicas, que hacen referencia a la presencia del nivel freático muy alto, característica muy significativa de los suelos de Terra Chá.

Terra Chá es una comarca de tradición ganadera, destacando el vacuno de leche; y por ello los cultivos dominantes son la pradera y el maíz forrajero. La superficie del maíz ha aumentado a lo largo de los últimos años hasta cerca del 20% de la superficie cultivada

total en la actualidad (GOMEZ *et al.*, 2003). El aumento de la producción láctea a lo largo de los últimos 20 años exigía bien un aumento de la superficie útil para aumentar la producción de alimento para ganado o bien intensificar la producción de forrajes (MARIN LOPEZ, 2013). La solución que se adoptó (debido a los elevados precios de la tierra) fue la elección de cultivos forrajeros de alta productividad (CUESTA *et al.*, 2010). Según CASTELAO & DÍAZ FIERROS (1992), la aptitud de los suelos para el cultivo de maíz en Terra Chá es mediocre, debido a la limitación del espesor del suelo y el exceso de pedregosidad del mismo. También el régimen térmico de la comarca se muestra como limitante, pues el régimen de riadas limita la duración del periodo vegetativo y además los suelos aluviales sobre materiales arcillosos limitan al cultivo por hidromorfía, pues es este cultivo es sensible al encharcamiento. Estos mismos autores señalan que gran parte de los suelos de esta comarca si son adecuados para el cultivo de prados permanentes, aunque los suelos sobre sedimentos arcillosos pueden ver mermada su producción por el encharcamiento en invierno o la sequía en verano. Según el INSTITUTO GALLEGO DE ESTADÍSTICA, en 2009 los cultivos forrajeros en la comarca de Terra Chá suponen el 34% del total de la provincia de Lugo. Para adaptarse adecuadamente a la climatología de Galicia las rotaciones de cultivos de forrajeros llevan al empleo de praderas y/o maíz forrajero o bien la rotación combinada de ambos (MARIN LOPEZ, 2013). La posibilidad de realizar dos cultivos por año en esta zona se ve disminuida por la alta pluviometría que puede provocar encharcamiento de las parcelas; limitando la entrada de maquinaria, para el laboreo y la siembra, esto hace que sea muy difícil establecer un cultivo de invierno (BUENO *et al.*, 2006).

2.1.2 Parcela experimental

La parcela estudiada tiene una superficie de 10 Ha, y está localizada en la finca experimental Gayoso-Castro, Castro Riberas de Lea, Lugo, España. Las coordenadas

geográficas son latitud 43° 16'14''N y longitud 7° 49'20'' W, con una elevación media de 403 m (oscilando entre 402.85 m y 403.95 m) y una pendiente del 1% (Figura 2.2).

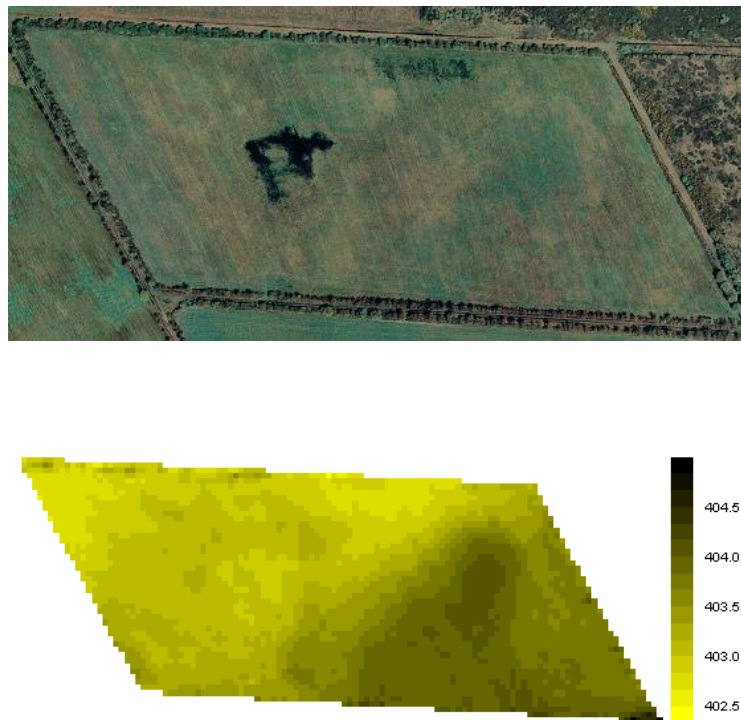


Figura 2.2.- Ortofotografía y Mapa altitud de la parcela estudiada.

El suelo de área experimental está desarrollado sobre materiales del Cuaternario, ricos en gravas; con una potencia variable de 1.5 m a 2 m. Por debajo de estos sedimentos materiales arcillosos del Terciario. El suelo del área de estudio tiene un perfil con horizontes A_p - B_w - B_{tg} y presenta características hidromórficas generalizadas; en la zona de la parcela estudiada con cotas topográficas más bajas se forma una pequeña laguna durante el período invernal. Este suelo ha sido clasificado como un Fluvisol úmbrico de acuerdo con la FAO (CASTELAO & DÍAZ FIERROS, 1992); otros autores han clasificado dicho suelo como Cambisol gleico (DAFONTE *et al.*, 2014).

El clima del área de estudio según la clasificación de Köppen es del tipo Csb, clima de transición entre Atlántico y Mediterráneo. Un clima templado-cálido con una estación seca en verano (CASTELAO & DÍAZ FIERROS, 1992).

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación Media (mm) 30 años	94	87	89	68	88	56	13	29	56	64	117	108	869
Temperatura Media (°C) (30 años)	5.9	6.1	8.3	10.4	12.2	14.8	17.2	17.6	15.4	12.4	7.7	5.7	11.14
Precipitación (mm) Año 2011	127	79	55	52	49	1	16	25	30	124	68	76	702
Temperatura Media (°C) Año 2011	6.6	6.5	8.3	12.9	13.5	15.6	16.5	17.7	17.3	13	9.7	6.5	12

Tabla 2.1.- Datos medios mensuales de precipitación y temperatura normalizados para un período de 30 años (CASTELAO & DÍAZ FIERROS, 1992) y precipitación y temperatura media mensual en el año 2011. Datos obtenidos de la Estación Meteorológica de Castro Riberas de Lea (Lugo).

El uso de esta parcela durante los 5 años previos al muestreo ha sido como pradera, anteriormente había sido dedicada a cereal. En febrero-marzo se fertiliza con N-P-K (8-24-16) con una dosis anual de $450 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y en octubre recibe una enmienda caliza de $3500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

2.2 MEDIDA EN CONTINUO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE

La conductividad eléctrica del suelo (CE_a) ha sido determinada mediante un equipo de inducción electromagnética *EM38-DD* (GEONICS LIMITED, 2005). El aparato está compuesto por dos unidades de lectura, una en la posición horizontal (CE_{aH}) y otra en la posición vertical (CE_{aV}), cuya curva de respuesta relativa demuestra una mayor sensibilidad del aparato hasta 0.4 m en el dipolo horizontal y de 1.5 m en el dipolo vertical (McNEILL, 1980; GEONICS LIMITED, 2005). Las especificaciones técnicas de este aparato pueden verse en la Tabla 2.2.

Rango de medida	Hasta 1.000 mS m ⁻¹
Espacio entre bobinas	1 m
Intervalo de error	± 0.1%
Frecuencia (vertical)	14.6 kHz
Frecuencia (horizontal)	17.0 kHz
Batería	9 V
Autonomía	30 horas

Tabla 2.2. Especificaciones del equipo de inducción electromagnética EM38-DD.

MC NEILL (1992) y SUDDUTH *et al.* (2001) describen la respuesta relativa vertical y horizontal de los aparatos de inducción electromagnética en el suelo mediante las ecuaciones:

$$V(Z) = 4Z / (4Z^2 + 1)^{1/2} \quad (2.1)$$

$$H(Z) = 4Z / (4Z^2 + 1)^{1/2} \quad (2.2)$$

La sensibilidad relativa del sensor de inducción electromagnética disminuye al aumentar la profundidad, tanto para el dipolo vertical como para el horizontal. Si bien es el dipolo horizontal aquel que presenta una mayor sensibilidad a la distancia; como puede observarse en la Figura 2.3.

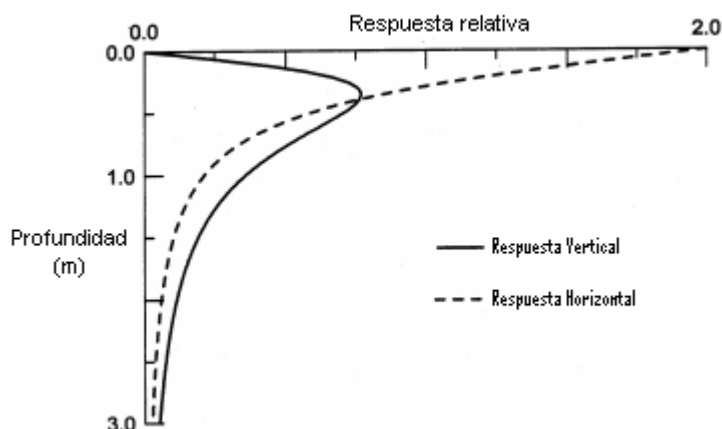


Figura 2.3. Respuesta del sensor EM-38 en función de la profundidad (Adaptado de MCNEILL, 1992).

Siguiendo las recomendaciones de GEONICS (2005) el aparato fue calibrado antes de su utilización en la parcela; según SUDDUTH *et al.* (1999) es aconsejable calibrar el aparato cada hora debido a la sensibilidad del mismo a las condiciones ambientales (temperatura del aire). Así mismo, el aparato es sensible a la presencia de objetos metálicos, con lo cual el operador no debe portar ningún objeto que pueda afectar a la calibración (GEONICS LIMITED, 2005). Los datos iniciales se corrigen para tener en cuenta los efectos de la oscilación de la temperatura durante el periodo de medida. Esta corrección se efectuó considerando que existía una deriva de tipo lineal (en función del tiempo) a lo largo del transecto. En la Figura 2.4 se puede observar a lo largo de un transecto de 370.36 m los datos iniciales, existe una medida en el tiempo cero en un transecto inicial y una medida tras 2 horas en el mismo transecto, corrigiéndose la deriva considerándola lineal con el tiempo. La Figura 2.4 muestra las medidas de CE_a en el transecto en el tiempo cero y al

final de las medidas, se puede observar claramente esta deriva observando las medias móviles. En este transecto, el valor inicial de la CE_aV osciló entre $8.25 - 12.5 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ mientras que el intervalo de la CE_aH fue entre $6.38 - 9.25 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$. Una vez realizado el calibrado la CE_aV pasa a un intervalo de $8.75 - 13.38 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ y la CE_aH de $5.63 - 8.13 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$. Los valores que podemos considerar bajos, algo que ya les ocurría a otros autores en la misma zona; SIQUEIRA (2009) valores de $5.75 - 18.38 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ en la CE_aV . VALCÁRCEL *et al.* en 2013 hallaron por su parte un intervalo de $7-12 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ en otro suelo de Galicia.

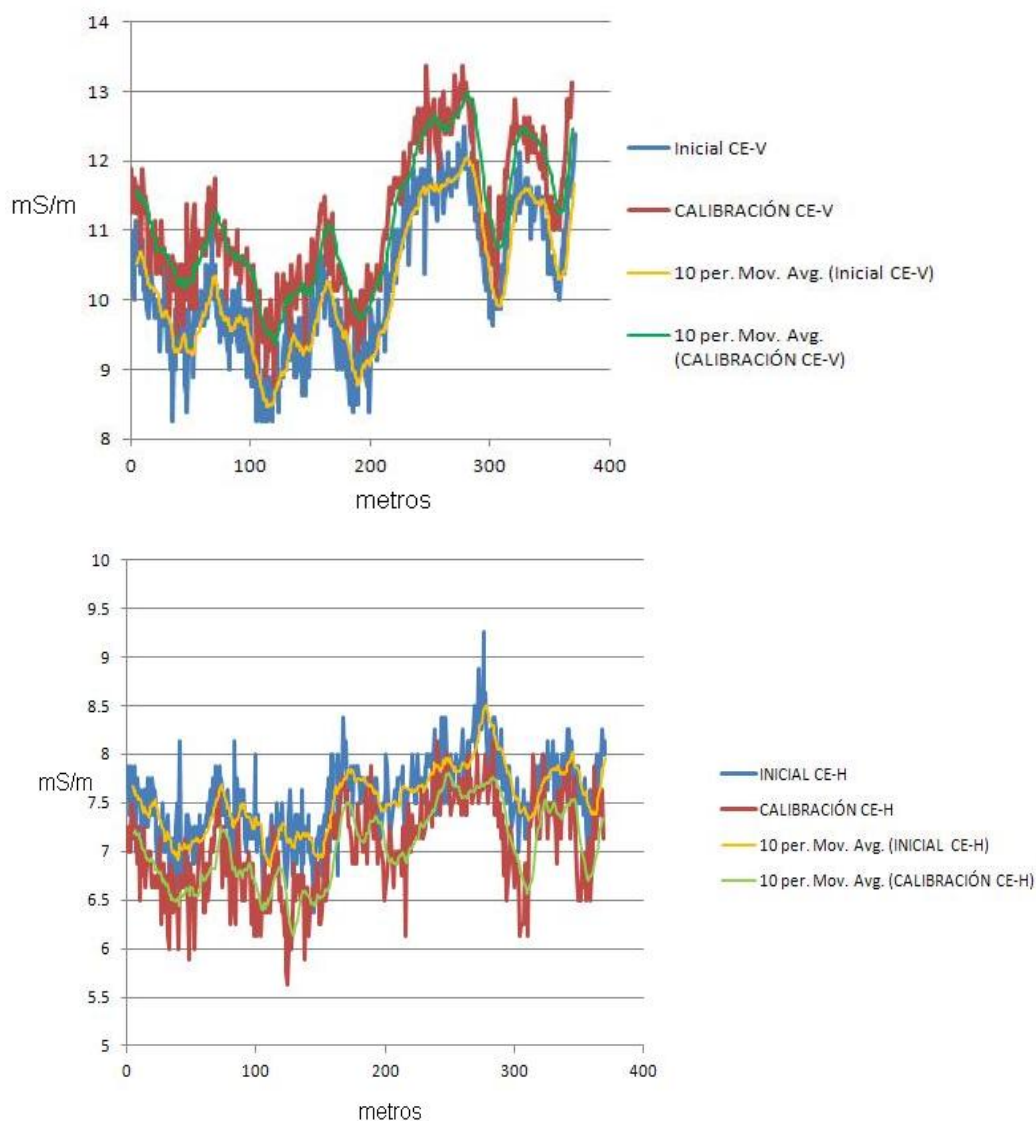


Figura 2.4 Deriva de la medida de la conductividad eléctrica a lo largo del transecto.

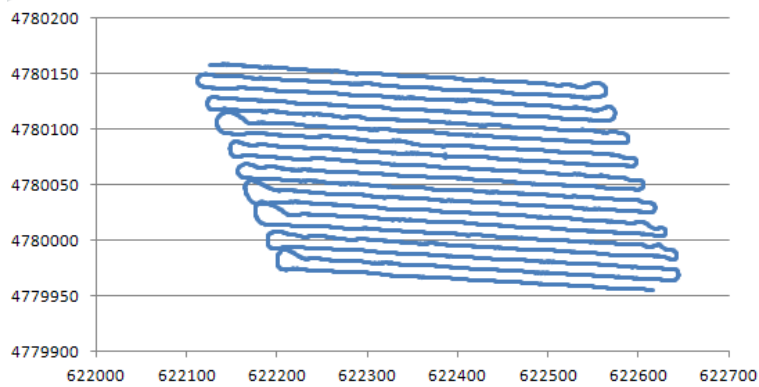


Figura 2.5. Muestreo de la conductividad eléctrica aparente del suelo.



Figura 2.6. Equipo de medida de la conductividad eléctrica aparente del suelo.

El muestreo fue realizado en la fecha 10/9/2011, realizándose en total 9581 medidas en continuo (Figura 2.5). Se utilizó un carro no metálico construido en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Santiago de Compostela (Figura 2.6). Se utilizó un GPS-RTK para georreferenciar las medidas tomadas con el *EM38-DD*. Las líneas de medida estaban separadas entre sí 10 m, con una intensidad de $0.66 \text{ medidas} \cdot \text{m}^{-2}$.

Considerando todos los datos de CE_a obtenidos de la parcela; la CE_aV presenta un intervalo de $6.08 - 16.71 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ con una media de $10.70 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ y la CE_aH un intervalo de $5.35 - 13.53 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ y una media de $7.94 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$.

2.3 RED DE MUESTREO OPTIMIZADO A PARTIR DE LA CE_a

Actualmente existen distintos modelos para optimizar puntos de muestreo a partir de distintas variables, aunque suele utilizarse con frecuencia la CE_a . Este método fue utilizado en otra parcela de la misma área de estudio por SIQUEIRA (2009).

Mediante el software ESAP 2.35 se determinaron los 80 puntos de muestreo optimizado de la parcela (Figura 2.7). En ellos se muestrearon las propiedades físicas, macronutrientes, micronutrientes y metales pesados, así como la conductividad eléctrica aparente (CE_a) del suelo.

El software ESAP 2.35 (Electrical Conductivity or Salinity, Sampling, Assessment and Prediction) (LESCH *et al.*, 2000) también fue utilizado para determinar la posición optimizada de los nuevos puntos de muestreo, por medio de la herramienta computacional ESAP-RSSD (Response Surface Sampling Design) que utiliza un modelo de regresión lineal múltiple (LESCH *et al.*, 1995, LESCH *et al.*, 2000) para la determinación optimizada de los puntos de muestreo donde se midió la conductividad eléctrica aparente del suelo (CE_a). En este caso, el proceso de diseño del muestreo optimizado se inicia con una transformación logarítmica (\ln) de las lecturas de conductividad eléctrica aparente del suelo (CE_a) en el dipolo vertical ($\ln CE_a V$) y en el dipolo horizontal ($\ln CE_a H$), obteniendo una variable con superficie de tendencia combinada, considerando su localización original (x, y) (LESCH *et al.*, 2000). Posteriormente, los datos de la conductividad eléctrica aparente del suelo ($CE_a V = z_1$ y $CE_a H = z_2$) se correlacionan con las coordenadas de ubicación de la superficie presupuesta y de esta manera, es posible minimizar los valores obtenidos en la predicción estimando valores que representen las diferentes superficies de respuesta para cada una de las nuevas configuraciones.

Para elegir la mejor posición para la conductividad eléctrica aparente del suelo (CE_a) para el nuevo modelo de muestreo, todos los parámetros tienen que ser significativamente diferentes de cero ($P > 0.05$) y con la menor suma de cuadrados de los errores estimados (PRESS score, Predicted Residual Sum of Squares). La independencia espacial residual fue examinada por medio del test de autocorrelación residual de Moran (BRANDSMA & KETELLAPPER, 1979; LESCH *et al.*, 1995). El software ESAP-RSSD permite la determinación de 6, 12 y 20 nuevos puntos de muestreo optimizados. De esta manera, el área de estudio fue dividida en 4 subáreas A, B, C y D (Figura 2.8), escogiendo el software ESAP-RSSD 20 puntos de de cada una para lograr los 80 puntos de muestreo deseados.

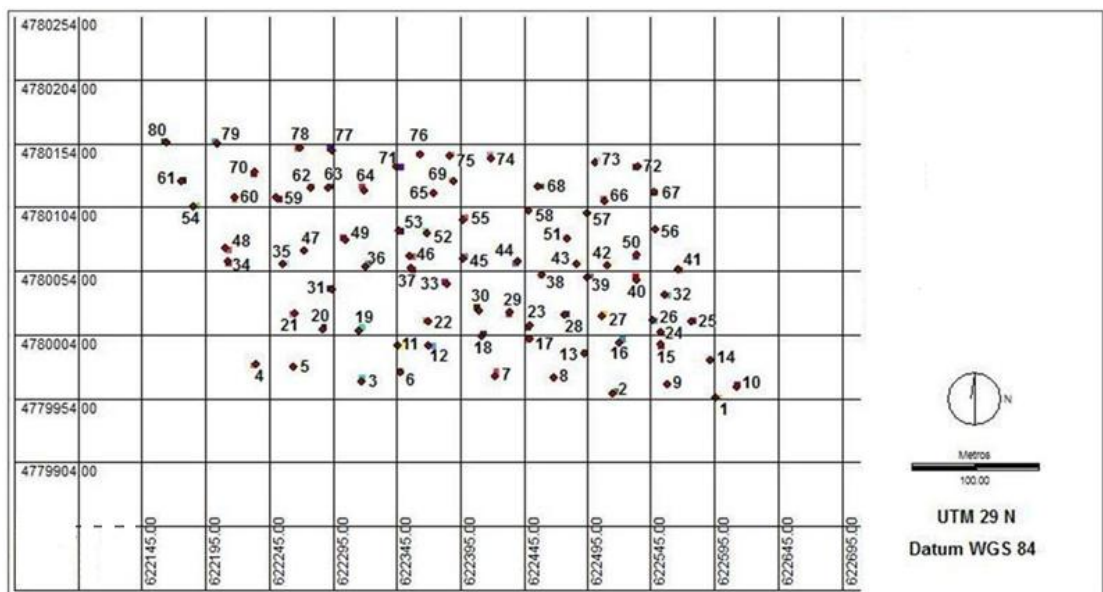
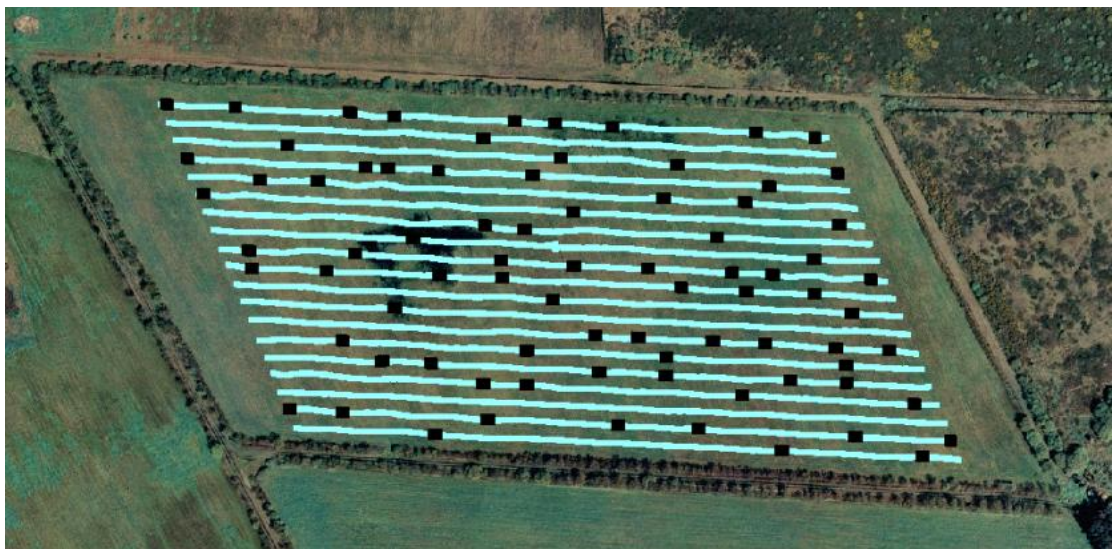


Figura 2.7.- Esquema del muestreo optimizado (80 puntos).

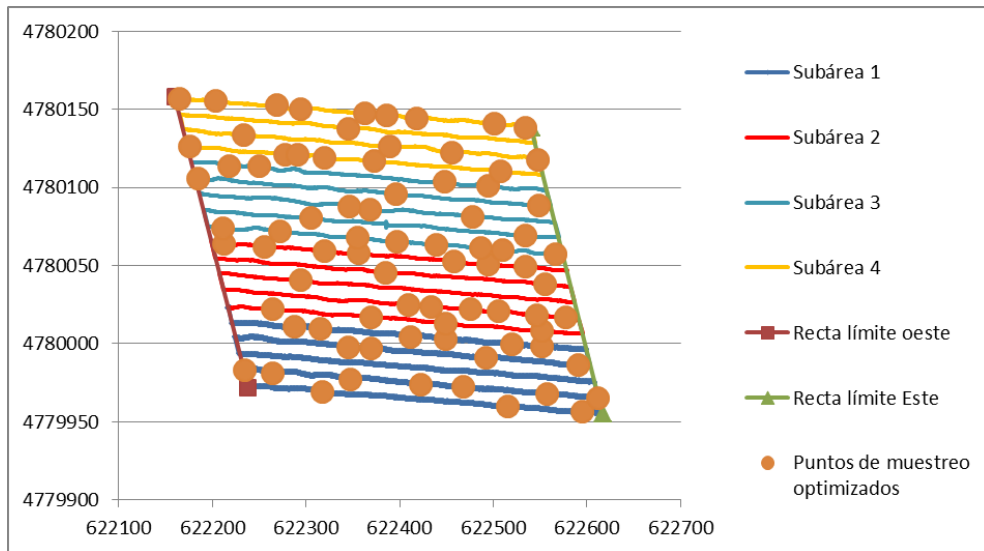


Figura 2.8.- Mapa (UTM) de la división de la parcela en subáreas para la elección de puntos de muestreo optimizado.

Se tomaron 80 Muestras de 0 a 20 cm y >20 cm en el Horizonte A y 9 en el horizonte B. Debido a que la profundidad del horizonte A es variable; de las 80 muestras tomadas a profundidad >20 cm: 12 de ellas llegaron a una profundidad de 40-48 cm, 39 de 34-39 cm, 21 de 30-33 cm y 8 de 25.5-29.5 cm.

En esta tesis se analizan las muestras tomadas de 0 a 20 cm y >20 cm. Con los datos obtenidos a estas dos profundidades de muestreo se efectuó una ponderación para obtener los resultados correspondientes a todo el Horizonte A. La media ponderada de todas las propiedades estudiadas para el Horizonte A se obtuvo de acuerdo con la expresión:

$$\frac{(X_1 \cdot 20) + (X_2 (T - 20))}{2} \quad (2.3)$$

X_1 = Valor de la propiedad 0-20cm; X_2 = Valor de la propiedad >20cm y T= Profundidad total de Horizonte A.

2.4 RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES TOPOGRÁFICAS &

LA CE_a

El intervalo de la altura de los 80 puntos de muestreo optimizado obtenidos es de 402.85 – 403.95 m y una media de 403.39 m. Teniendo en cuenta los valores de CE_a en los 80 puntos; la CE_aV presenta un intervalo de 6.72 – 14.67 $mS \cdot m^{-1}$ con una media de 10.72 $mS \cdot m^{-1}$, por su parte la CE_aH tiene un intervalo de 6.40 – 9.89 $mS \cdot m^{-1}$ y una media de 7.93 $mS \cdot m^{-1}$.

En este apartado también se presenta un análisis de componentes principales de variables topográficas obtenidas a partir del modelo de elevación digital de la parcela, donde las variables estudiadas han sido altura, pendiente, curvatura y área de drenaje. El modelo de elevación digital procede del IGN con un tamaño de celda de 5x5 m y procedente de datos LIDAR (MDT 0.5), el análisis de los datos topográficos fue realizado con ARCGIS 9.3.

La altura considerada ha sido la que corresponde a los 80 puntos de muestreo, mientras que la pendiente, curvatura y área de drenaje fueron calculadas en el entorno de dichos puntos. Además, se efectúa un análisis de la dependencia entre dichas propiedades y la CE.

	CPT1	CPT2
Autovalores	1.192	1.098
Proporción Varianza	0.298	0.275
Varianza acumulada	0.298	0.573
Variables del CP		
Altura	0.697**	-0.305**
Pendiente	0.410**	0.614**
Curvatura	-0.577**	0.531**
Área de Drenaje	-0.454**	-0.588**
Correlaciones CEa		
CEaV	-0.321**	-
CEaH	-	-

Tabla 2.3. Componentes Principales Topográficas.

(* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

Varios autores (JOLLIFFE, 1986; KATTREE & NAIK, 2000) sostienen que son los componentes principales con autovalores ≥ 1 los tienen una contribución significativa a la explicación de la variabilidad de los datos.

	CPS1	CPS2	CPS3
Autovalores	1.966	1.123	1.015
Proporción Varianza	0.327	0.187	0.169
Varianza acumulada	0.327	0.515	0.684
Variables del CP			
Altura	-0.503**	0.009	-0.504**
Pendiente	-0.320**	0.653**	0.270*
Curvatura	0.351**	0.317**	0.620**
Área de Drenaje	0.027	-0.748**	0.444**
CEaV	0.890**	-0.038	-0.220*
CEaH	0.834**	0.188	-0.240*

Tabla 2.4. Componentes Principales Topográficas y la CEa

(* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

En la Tabla 2.3 se muestra el análisis de componentes principales de las variables topográficas seleccionadas, donde se obtienen dos componentes (con autovalores ≥ 1) que explican el 57% de la variabilidad de los datos.

El primer componente, **CPT**₁, explica el 30% de la variabilidad total de los datos, las cuatro variables topográficas contribuyen al mismo con pesos entre 0.41-0.69; el orden decreciente en función del peso en el componente es: Altura>Curvatura>Área de Drenaje>Pendiente. Se asocian altura y pendiente de forma positiva frente a curvatura y área de drenaje que lo hacen de forma negativa, por lo tanto a mayor altura, mayor pendiente y menor curvatura y área de drenaje. El **CPT**₂ explica un 27.5% adicional de la variabilidad, siendo en este caso el orden decreciente de los pesos dentro del componente: Pendiente>Área de Drenaje>Curvatura>Altura. En este caso el área de drenaje y la altura participan en el componente con signo negativo y la pendiente y la curvatura con signo positivo.

Únicamente el **CPT**₁ tiene correlaciones lineales; en este caso de signo negativo y altamente significativa con la CE_aV , con un $r=-0.32$. Indica que la tendencia es la disminución de la CE_aV al aumentar la altura y pendiente.

En la Tabla 2.4 se muestra el análisis de componentes principales topográficos incluyendo al análisis la CE_aV y la CE_aH . Se obtienen tres componentes (autovalores ≥ 1) que explican el 68% de la variabilidad de los datos.

El primer componente, **CPS**₁, explica el 33% de la variabilidad total de los datos, a este componente contribuyen todas las variables estudiadas salvo el área de drenaje; siendo el orden decreciente en función del peso en el componente: $CE_aV > CE_aH > \text{Altura} > \text{Curvatura} > \text{Pendiente}$. La CE_aV , CE_aH y la curvatura se asocian con signo positivo frente a la asociación con signo negativo de la altura y pendiente. En consecuencia la CE_aV y la CE_aH tienden a ser mayores conforme disminuye la altura y la pendiente. El **CPS**₂ explica un 18.7% adicional de la variabilidad, siendo en este caso el orden decreciente por peso dentro del componente: Área de Drenaje > Pendiente > Curvatura. El área de drenaje contribuye al componente con signo negativo

mientras que la pendiente y la curvatura se asocian con signo positivo. En **CPS₃** todas las variables estudiadas participan en el componente con un mayor o menor peso. El orden de pesos decrecientes es: Curvatura>Altura>Área de Drenaje>Pendiente>CE_aH>CE_aV. En cuanto a las asociaciones, la altura, CE_aV y CE_aH lo hacen son signo negativo; la curvatura, el área de drenaje y la pendiente lo hacen positivamente.

2.5 CONCLUSIONES

1. Los valores de CE_aV medidas en continuo oscilaron entre 8.25 – 12.5 $mS \cdot m^{-1}$ y entre 6.38 – 9.25 $mS \cdot m^{-1}$ para la CE_aH . Después del calibrado la CE_aV muestra un intervalo de 8.75 – 13.38 $mS \cdot m^{-1}$ y la CE_aH de 5.63 – 8.13 $mS \cdot m^{-1}$. Estos valores son inferiores a los obtenidos en otros estudios de la misma zona.
2. Para obtener el muestreo optimizado de 80 puntos fue necesario dividir la parcela de 10 Ha en 4 subzonas donde se eligieron 20 puntos en cada una con el software ESAP-RSSD.
3. El estudio de las componentes principales de las variables topográficas y la CE_a muestra una asociación en el CPS_1 entre la altura y la pendiente (de signo negativo) frente la asociación positiva de la CE_aV - CE_aH . Es decir, en la parcela estudiada a mayor altura y pendiente menor será la CE_a .

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES GENERALES

3.1 INTRODUCCIÓN

El suelo es un sistema abierto, constituido por tres fases. La fase sólida, formada por compuestos inorgánicos (fracción mineral) y orgánicos (materia orgánica) dejando huecos donde se localizan las fases líquida y gaseosa. Las interacciones entre la fase líquida y la sólida tienen gran importancia puesto que la fase sólida está formada por partículas con una elevada superficie específica cargadas eléctricamente; hecho que contribuye a procesos de absorción e intercambio iónico (DON SCOTT, 2000; PORTA *et al.* 2003). Estos fenómenos se antojan imprescindibles para que el suelo se comporte como un depurador natural y para la nutrición de las plantas. Las fases líquida y gaseosa se hallan en constante cambio, tanto en cantidad como composición; recibiendo aportes de agua mediante la lluvia y el riego y perdiendo ésta por evapotranspiración y percolación.

Las partículas que constituyen la fracción mineral del suelo, tienen un amplio rango de tamaños, variando desde rocas, con un diámetro mayor de 0.25 cm hasta las arcillas, con un diámetro equivalente inferior a 2 mm. El estudio de las partículas minerales puede llevarse a cabo mediante distintos enfoques, atendiendo al tamaño y forma de las partículas, a su mineralogía, grado de meteorización, relaciones entre las mismas, etc. La granulometría expresa las proporciones relativas de las diferentes partículas minerales inferiores a 2 mm (tierra fina), agrupadas por clases de tamaños en fracciones granulométricas tras la destrucción de agregados (PORTA *et al.* 2003). Las diferentes clases texturales se representan mediante los triángulos de textura o diagramas triangulares.

La tierra fina es la fracción activa del suelo, tanto desde el punto de vista físico, físico-químico o biológico. Las arenas y el limo se consideran el llamado esqueleto del

suelo. Las partículas de este esqueleto permanecen unidas mediante los coloides, constituidos por arcillas y materia orgánica.

La granulometría es una de las características más estables del suelo, y puede considerarse una determinación básica para cada horizonte. Cuando se determina el contenido de arena, limo y arcilla de una unidad de suelos, no es necesario repetir el análisis al cabo del tiempo.

Los componentes orgánicos del suelo constituyen una pequeña parte en relación a los componentes inorgánicos, si bien tienen una importante influencia sobre las propiedades físico-químicas del suelo y también del comportamiento de éste cuando se ve alterado por el laboreo. Generalmente, no se ha prestado la atención debida al papel de la materia orgánica (MO) en los suelos agrícolas, suponiendo que los fertilizantes pudieran sustituirla, lo cual es sólo cierto en cuanto al aporte de nutrientes. El uso del suelo tiene una gran influencia sobre el contenido de MO, pues afecta especialmente a la tasa de reposición. En suelos con altos contenidos en MO, un buen sistema de manejo del suelo debe aportar como mínimo la misma cantidad de MO que se pierde por mineralización. En suelos muy degradados, con bajo contenido de MO, los sistemas de manejo deben perseguir el incremento de la MO. Los sistemas conservacionistas del suelo, como el no laboreo o mínimo laboreo, tienden a incrementar el contenido de MO en el suelo, en especial en los horizontes superficiales. La relación entre la masa y el volumen de los componentes de las tres fases del suelo se utilizan habitualmente para definir parámetros básicos, que son útiles en la caracterización física del suelo. Para ello se estudia tanto la densidad real (masa de sólidos por unidad de volumen) como la densidad aparente (relación entre masa y volumen total de suelo, incluyendo los poros). Así mismo, el estudio de estas densidades nos lleva a obtener la porosidad del suelo, que puede ser crítica en el crecimiento radicular de las plantas.

3.1 PROPIEDADES ESTUDIADAS

3.2.1 pH

La acidez actual del suelo viene expresada por la concentración de iones (H^+) presentes en la solución del suelo. Para caracterizarla se utiliza, como unidad de medida el pH.

El término pH de una solución se define como el $-\log [H^+]$, es la actividad de los iones hidrógeno en soluciones acuosas; al determinar los H^+ también se está proporcionando implícitamente la concentración de OH^- . Se expresa según una escala de 0 a 14 (si bien generalmente en los suelos queda limitado entre 4 y 10). Los valores pequeños expresan pH ácido, el $pH=7$ se considera neutro y los valores mayores de 7 representan un pH básico.

El pH de un suelo es el valor de este potencial medido en una disolución suelo-líquido. El conocimiento de este potencial del suelo permite una aproximación al de sus características químicas, tales como: la movilidad de iones, el equilibrio y la cinética de disolución/precipitación. El equilibrio de las reacciones de óxido-reducción también es importante para entender la disponibilidad de nutrientes para las plantas y la respuesta negativa de muchas de ellas a la acidez del suelo (BLOOM, 2000). Además, es útil porque determina la actividad relativa de plantas y microorganismos.

La resistencia que presenta un suelo al cambio de pH se denomina “poder tampón” y ésta será más fuerte si posee una capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.) importante, es decir, si contiene una cantidad significativa de arcilla y materia orgánica.

La determinación del pH del suelo se realiza en una suspensión suelo-líquido (1:1 ó 1:2.5 son las relaciones más habituales); los métodos estándar más comunes utilizan agua destilada, 0.1M KCl ó 0.01M $CaCl_2$ (ROWELL, 1994; THOMAS, 1996).

Los valores de pH en agua de los sistemas naturales se hallan generalmente en el intervalo 4.5 a 10. Dependiendo del valor del pH los suelos pueden ser (1.1):

pH	Evaluación
<4.5	Extremadamente ácido
4.5-5.0	Muy fuertemente ácido
5.1-5.5	Fuertemente ácido
5.6-6.0	Medianamente ácido
6.1-6.5	Ligeramente ácido
6.6-7.3	Neutro
7.4-7.8	Medianamente básico
7.9-8.4	Básico
8.5-9.0	Ligeramente básico
9.1-10.0	Alcalino
>10.0	Fuertemente alcalino

Tabla 3.1. *Valores de pH en agua (USDA, 1971).*

Los efectos negativos de la acidez no se manifiestan hasta valores de pH inferiores a 5.5 por la toxicidad del aluminio y la poca biodisponibilidad de los elementos nutrientes. Los suelos con carbonato cálcico, característicos de zonas áridas y semiáridas, tienen un pH del orden de 7.5 a 8.5. Los que presentan pH de 9.0 a 12.0 contienen carbonato sódico y sus condiciones tanto físicas como químicas son muy desfavorables.

La acidez y basicidad del suelo afectan a sus diversas propiedades, a su comportamiento y al crecimiento de las plantas:

Propiedades físicas afectadas: Dispersión-floculación de los coloides: iluviación, estructura, porosidad y aireación, conductividad hidráulica y régimen de humedad y temperatura.

Propiedades químicas afectadas: Meteorización química, movilidad de elementos tóxicos (Al, Mn y metales pesados), disponibilidad de nutrientes (Ca Mg, y P), descomposición de materia orgánica, adsorción de aniones (fosfatos, sulfatos y cloruros), procesos de hidromorfismos y neoformación de minerales de arcilla.

Propiedades biológicas afectadas: Relaciones bacterias-hongos, población bacteriana, nodulación en leguminosas, humificación, fijación de nitrógeno y movilización y adsorción de nutrientes.

El pH de un suelo es una característica muy variable en el espacio y en el tiempo (la medida *in situ* no se corresponde con los valores que se obtienen al determinarlo en el laboratorio). En un clima templado, el pH de un mismo horizonte varía según la época del año; así tiende a bajar en verano (esto se explica por la producción de ácidos orgánicos debido a la alta actividad biológica en esta época) y a aumentar en invierno (debido a la dilución de los iones H^+ en la solución del suelo por efecto de las lluvias); esta variación estacional puede llegar a ser de 0.5 hasta 1 unidad en suelos calizos.

Además, el pH de un suelo también puede variar como consecuencia de la adición de fertilizantes, del agua de riego y de la descomposición de la materia orgánica.

En cuanto a la relación del pH con los aspectos agronómicos, se ha destacado la influencia del pH del suelo sobre la asimilabilidad de los principales elementos fertilizantes y oligoelementos. El óptimo en agronomía estaría entre 6.5-7 para suelos no calcáreos.

3.2.2 Propiedades de cambio

La acidez de cambio o de cambio corresponde a la cantidad total de posiciones de cambio que están ocupadas por (H^+), en equilibrio con una determinada concentración de H^+ en la solución del suelo; dependerá de los coloides del suelo y de los elementos metálicos que estos pueden fijar.

La arcilla y el humus son coloides electronegativos capaces de fijar en su superficie elementos electropositivos (cationes e hidrogeniones). Cuando la cantidad de cationes fijados es insuficiente para neutralizar las cargas electronegativas del coloide, los H^+ libres en la solución del suelo vienen a situarse sobre la superficie neutralizando estas cargas

negativas. Los cationes que frecuentemente ocupan las posiciones de cambio en los suelos son: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , NH_4^+ , Mn^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} .

En los suelos ácidos predominan H^+ y Al^{3+} , en los suelos alcalinos predominan las bases fundamentalmente el Na^+ y en los neutros el Ca^{2+} .

Para caracterizar el estado del complejo adsorbente se utilizan las siguientes unidades:

- *Capacidad de total de cambio/Capacidad de intercambio catiónico (T)*: Cantidad máxima de elementos electropositivos de toda clase, expresados en $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$. $T = \text{Ca}^{2+}$, Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ , Al^3
- *Cationes cambiables (S)*: Capacidad total de cambio exceptuando los hidrogeniones. $S = T - \text{H}^+ = \text{Ca}^{2+}$, Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^3
- *Porcentaje de saturación de bases (V)*: Es la relación entre los cationes cambiables y la capacidad total de cambio; expresada en %. $V = (S \cdot T^{-1}) \cdot 100$

Capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.)

La capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.) expresa el número de moles de iones carga positiva adsorbidos que pueden ser intercambiados por unidad de masa seca, bajo unas condiciones dadas de temperatura, presión, composición de la fase líquida y una relación de masa-solución dada.

La medida de la C.I.C. representa el número total de enlaces del complejo coloidal del suelo, expresado en $\text{cmol}_c \cdot \text{Kg}^{-1}$. Es un valor que cuantifica la capacidad eléctrica del complejo adsorbente siempre que sea debidamente contrastado con la composición de humus y de los distintos tipos de arcillas existentes en el suelo estudiado.

La C.I.C. de un suelo variará de horizonte en horizonte y en cada uno de ellos dependerá del contenido y tipos de minerales de arcilla y de componentes orgánicos. Dado

que la carga neta procede de cargas permanentes y de cargas variables, la C.I.C. depende del pH, lo que se hace notorio en aquellos horizontes con una proporción elevada de cargas variables. Por ello, el valor obtenido de la C.I.C. de un suelo ácido será menor si se determina al pH del suelo que si se utilizan soluciones tamponadas a mayor pH.

La capacidad de suelo para el intercambio de iones (en la interfase sólido-líquido) y la clase de intercambio en si misma tiene importantes repercusiones en el comportamiento del suelo:

- Disponibilidad de nutrientes para las plantas.

- Interviene en los procesos de floculación de arcillas, por lo tanto siendo importante en el desarrollo estructural del suelo y en la estabilidad de sus agregados.

- Permite la retención de elementos contaminantes incorporados al suelo (depuración natural).

Los suelos cultivados fértiles de países templados presentan en su horizonte Ap valores que pueden oscilar entre 10-20 $\text{cmol}_c \cdot \text{Kg}^{-1}$ según su textura y contenido orgánico. Valores inferiores indican poca capacidad de adsorción y, por lo tanto mayor facilidad para el lavado de cationes. Si las C.I.C. son superiores a 25 $\text{cmol}_c \cdot \text{Kg}^{-1}$, pueden ejercer un exceso de adsorción que se traduce en el bloqueo de los cationes y, por lo tanto, una deficiencia en la función nutritiva del suelo (COBERTERA, 1993.)

Calcio

El contenido en calcio de la corteza terrestre es aproximadamente del 3.6%, el Ca^{2+} adsorbido es el calcio cambiante. El calcio iónico (Ca^{2+}) se encuentra fijado en el complejo adsorbente o libre en las soluciones del suelo. El Ca^{2+} se fija en la superficie de los coloides arcillosos y húmicos y floclula estas partículas formando el complejo arcillo-húmico. En este complejo suele ser el catión fijado más abundante y está retenido por alta energía de fijación. En ocasiones el Ca^{2+} fijado puede llegar a representar hasta el 80% de la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.) del complejo.

El Ca^{2+} adsorbido está en equilibrio dinámico con el Ca^{2+} libre en la solución del suelo. Si ésta se empobrece hay un proceso de desorción catiónica con salida del Ca^{2+} del complejo y paso a la solución del suelo. Inversamente, si ésta se enriquece, se produce una adsorción catiónica que fija parte del Ca^{2+} libre sobre el complejo adsorbente.

Potasio

El potasio en el suelo puede encontrarse en forma iónica (K^+) y combinado en diferentes compuestos minerales y orgánicos. De éstos, los minerales son los más importantes desde todos los puntos de vista.

Las formas iónicas pueden presentarse:

- Libres en la solución del suelo.
- Fijadas superficialmente sobre el complejo adsorbente.
- En el interior de la red cristalina de determinadas arcillas.

Los compuestos minerales más representativos son:

- De origen magmático y correspondiendo a rocas primarias: Feldespatos (*Ortosa*) y Micas (*Moscovita*, *Biotita* y *Lepidolita*).

■ De origen sedimentario: *Silvinita*, *Carnalita* y *Kainita*.

El potasio de los silicatos es liberado muy lentamente, ya sea por la meteorización de estos materiales o por ataque microbiano. Los compuestos de origen sedimentario se producen por precipitación química y, debido a su menor dureza y mayor solubilidad, se alteran más fácilmente que los silicatos.

El potasio que se encuentra combinado formando parte de la materia orgánica del suelo puede liberarse y aparecer en forma de K^+ tras el proceso de mineralización. Las formas de potasio iónico (K^+) aparecen libres en la solución del suelo o fijadas, ya sea sobre el complejo adsorbente, en formas fácilmente cambiables, o incluidas en el interior de los espacios interlaminares de determinadas arcillas, en formas difícilmente cambiables.

La solución de suelo posee generalmente un bajo contenido en potasio. Este es el que utilizan las plantas y microorganismos, que además pudiera perderse por lixiviación. Por ello debe considerarse el contenido potásico de las soluciones del suelo como una situación transitoria que puede variar de acuerdo con la actividad de los vegetales, de los microorganismos y bajo el efecto de las lluvias y riegos.

El K^+ fijado en superficie por el complejo adsorbente presenta un equilibrio dinámico con el K^+ de la solución del suelo. La cantidad de K^+ adsorbido depende del contenido y clase de arcillas y del contenido y estado de la materia orgánica del suelo, es decir, de su capacidad de adsorción catiónica. El K^+ cambiante representa una fracción modesta de aquella capacidad, ya que generalmente no suele llegar al 10%.

El K^+ no cambiante se encuentra incluido en los espacios interlaminares de las arcillas. El término no cambiante, o retrogradado, no es del todo exacto, pues utilizando K^{40} se ha comprobado que, en muchas ocasiones, hay una cierta reversibilidad en el proceso de retrogradación, aunque no exista límite claro entre ambos procesos.

El mecanismo de fijación no cambiante, o retrogradación, depende de la naturaleza de las arcillas, ya que exige que la separación laminar sea suficiente y que los espacios interlaminares no estén ocupados por otros cationes. Podemos considerar:

- Caolinitas, cloritas y micas, retrogradación nula.
- Montmorillonita, retrogradación débil.
- Illita, retrogradación fuerte.
- Vermiculita, retrogradación fuerte.

Se comprueba que la retrogradación es máxima en suelos con arcillas expansibles del tipo 2:1. En ellas, el espaciado entre los oxígenos de dos capas de sílice es de tamaño similar al del K^+ , permitiendo la entrada y su fuerte fijación electrostática. El NH_4^+ se comporta de forma similar al K^+ por su igual carga y próximo radio iónico. Por esta razón, puede ocupar espacios interlaminares que quedarían vedados al K^+ . Los Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ no pueden penetrar en los espacios interlaminares, a menos que se produzca la apertura de láminas.

Magnesio

El magnesio se encuentra en el suelo combinado en formas orgánicas y minerales. La materia orgánica contiene algo de magnesio, pero su importancia cuantitativa es pequeña frente a las formas minerales.

Estas últimas aparecen como silicatos, carbonatos, sulfatos y cloruros; con distintos grados de alterabilidad.

Los silicatos son las formas menos alterables: olivino, piroxenos y anfíboles, biotita, piropero, etc. Talco, sepiolita, serpentina son silicatos de magnesio, hidratados, que proceden de la alteración de los silicatos anteriores. Las arcillas (clorita, illita, vermiculita, etc.) son silicatos de aluminio con magnesio.

Los carbonatos se alteran con una facilidad mayor que los silicatos. La magnesita y la dolomita, son los compuestos principales.

Los minerales más fácilmente alterables son los sulfatos y los cloruros: epsomita, kieserita, carnalita y kainita.

Además del magnesio combinado, existe Mg^{2+} , que se encuentra fijado en la superficie del complejo adsorbente y libre en las soluciones del suelo. La energía de retención es pequeña y, por ello, pasa con facilidad a estas soluciones.

Como consecuencia, en los suelos de los climas húmedos y en aquellos casos en que se aportan productos que pueden desplazar Mg^{2+} , aparece este elemento en gran proporción en las aguas de drenaje.

Considerando el origen del magnesio en el suelo, se deduce que la mayor parte de este elemento se encuentra en forma no lábil, es decir, no disponible para las plantas. Éste, se halla en equilibrio distribuido en tres formas: la parte lentamente asimilable, la asimilable y la parte rápidamente asimilable. La parte lentamente asimilable se refiere a que está atrapado en la red cristalina de minerales primarios y secundarios (NAVARRO BAYA & NAVARRO GARCÍA, 2000) y no está a disposición de las plantas de forma inmediata. El magnesio soluble y el de cambio son la fuente principal de este elemento en los suelos, comportándose de una manera similar al calcio. Los porcentajes de Mg^{2+} , al igual que de Ca^{2+} , en la solución del suelo son muy inferiores a los que presenta el complejo de cambio, ya que la absorción preferente de los iones con doble carga es tan fuerte que sus concentraciones en la solución se reducen a un nivel próximo a las que muestran los iones K^+ y Na^+ (THOMPSON & TROEH, 1982). La adsorción de magnesio normalmente desciende al aumentar la relación K-Mg o Ca-Mg en la solución del suelo, al igual que cuando disminuye el pH.

El magnesio de las soluciones del suelo puede verse sometido a las siguientes acciones si los terrenos son de cultivo:

- Absorbido por las plantas cultivadas.
- Absorbido por la vegetación adventicia.
- Utilizado por los microorganismos del suelo.
- En equilibrio dinámico (adsorción-desorción) con el complejo adsorbente.
- Arrastrado en profundidad por las aguas de drenaje.
- Precipitado en forma de carbonatos y sulfatos.

Aluminio

Es uno de los principales constituyentes del suelo, absorbido por la mayoría de los vegetales. Aún no se le conoce función específica en la planta y por ello se le considera como elemento no esencial.

La sensibilidad de las diferentes especies es muy distinta. No es posible establecer una escala de tolerancia; si bien los niveles críticos suelen situarse en torno a $1\text{mM}\cdot\text{L}^{-1}$, para las plantas tolerantes y a $1\ \mu\text{M}\cdot\text{L}^{-1}$, para las más sensibles.

El aluminio absorbido tiende a acumularse en las raíces y no se desplaza con facilidad a la parte aérea. Los síntomas que se observan después de una absorción significativa, son un acortamiento y engrosamiento de las raíces; reduciéndose la ramificación de las mismas. Al aumentar la concentración de aluminio, las raíces se vuelven más sensibles a enfermedades. Los niveles fitotóxicos provocan en las plantas importantes modificaciones bio-químicas y fisiológicas. Aumento de la viscosidad del protoplasma de las células radiculares que provoca un descenso en la permeabilidad al agua y los elementos nutritivos; además interfiere en la división celular, respiración, metabolismo del nitrógeno, y la absorción de fosfatos, calcio, magnesio y hierro. Si bien, la similitud de los efectos del

aluminio con las carencias de fósforo y calcio, hacen difícil su interpretación en suelos ácidos. Los suelos ácidos $\text{pH} \leq 4$, contienen ácido aluminico libre muy tóxico para las plantas.

3.2.3 Materia orgánica

El suelo está formado por materias minerales y orgánicas, puede decirse que, en tanto no aparezcan estas últimas, el suelo no presenta las características adecuadas para ser soporte de la práctica agrícola.

La materia orgánica aparece en el suelo natural como consecuencia de la actividad de los seres vivos y está constituida, en sentido más amplio, por mezcla de microorganismos, residuos de vegetales y animales superiores. En los suelos cultivados puede haber, además, aportes de materias orgánicas de origen y características muy diversas que vienen a sumarse a los residuos antes citados.

La materia orgánica fresca, poco o nada descompuesta, sufre una primera evolución que la transforma en humus para, en una segunda etapa, continuar descomponiéndose hasta convertirse en elementos minerales. La primera etapa se denomina humificación y la segunda mineralización. Estos dos procesos coexisten en el suelo, siendo resultante de ambos el equilibrio húmico del suelo (Figura 3.1).

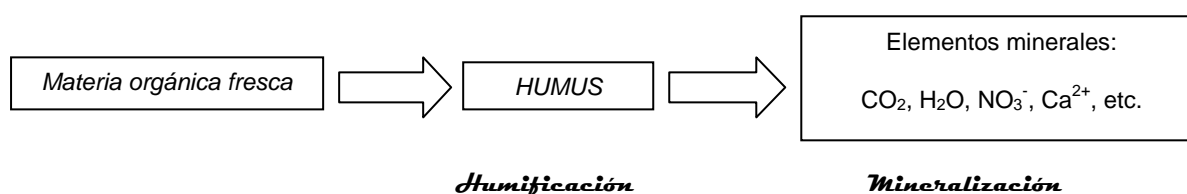


Figura 3.1 Esquema de la evolución de la materia orgánica.

La velocidad de humificación y mineralización y, en consecuencia, el equilibrio húmico del suelo depende de la actividad biológica que en él se desarrolla y ésta, a su vez,

es función de condiciones climáticas (temperatura y humedad), y edáficas (porosidad, textura, pH, estructura, permeabilidad, etc.). Además en un suelo no natural, dependerá también de condiciones de cultivo como laboreo, riego, fertilización, alternativas de cultivo, etc.

El contenido medio de los horizontes superficiales en suelos cultivados, suele oscilar entre el 1% y el 3%. Este contenido desciende en suelos sometidos a fuerte laboreo, o en rotaciones de cultivo de alta intensidad que dejen pocos residuos. Sin embargo no es tan importante el valor absoluto del contenido en materia orgánica, como la velocidad con que ésta evoluciona y el equilibrio al que tienden la humificación y mineralización.

La influencia de la materia orgánica en las propiedades del suelo es notable:

Propiedades físicas: Los suelos ricos en MO, se calientan más y mantienen un régimen térmico más estable, mejora la cohesión (hace más ligeros a los suelos arcillosos y más compactos a los arenosos), aumenta la estabilidad de los agregados (debido a su naturaleza coloidal), mejora la permeabilidad y el drenaje (mejor saneamiento del suelo), aumenta la resistencia a la erosión (hidráulica y eólica), y además aumenta la capacidad de retención de agua (mejorando el balance hídrico del suelo).

Propiedades químicas: Aumenta el “poder tampón”, aumenta la capacidad de adsorción y de intercambio iónico del suelo, impide la retrogradación del fósforo (favoreciendo la fertilidad fosfatada del suelo), permite formar quelatos con algunos cationes (lo cual favorece la fertilidad del suelo) y también regula la fertilidad nitrogenada del suelo.

Propiedades biológicas: Reduce los riesgos de encharcamiento, favorece la actividad microbiana aerobia, es fuente de energía carbonada (que los microorganismos extraigan la energía para multiplicarse), favorece la solubilización de compuestos minerales de baja solubilidad, favorece además, la rizogénesis y nutrición mineral de las plantas.

3.2.4 Granulometría

La granulometría expresa las proporciones relativas de las distintas partículas minerales inferiores a 2 mm (*tierra fina*), agrupadas tras la destrucción de los agregados, por clases de tamaños en fracciones granulométricas.

Para separar las diferentes fracciones granulométricas, arcilla, limo y arena; es necesario establecer los límites de las mismas. Los límites internacionalmente establecidos se muestran en la Tabla 3.2.

Fracción	Diámetros aparentes (mm)
Arena gruesa (A.G.)	2 – 0.2
Arena fina (A.F.)	0.2 – 0.05
Limo grueso (L.G.)	0.05 – 0.02
Limo fino (L.F.)	0.02 – 0.002
Arcilla (A)	< 0.002

Tabla 3.2.- *Tamaño de la partícula de las diferentes fracciones (USDA, 1975).*

El análisis granulométrico consiste en un proceso de segregación de partículas individuales agrupadas en fracciones. Para que los granos estén, separados se requiere la destrucción de los ligandos que los mantienen unidos formando agregados.

La granulometría es una de las características más estables del suelo, y puede considerarse una determinación básica de cada horizonte de un suelo. Una vez disponemos esta información para una unidad de suelos, no es necesario repetir el análisis al cabo del tiempo.

La importancia de conocer la granulometría reside en que permite inferir otras propiedades y características directamente relacionadas con el uso y comportamiento del suelo.

Afecta:

- Capacidad de retención de agua: Agua disponible para las plantas.
- Facilidad para realizar labores.
- Circulación del agua.
- Riesgos de erosión: hídrica y eólica.
- Capacidad de almacenamiento de nutrientes.
- Riesgo de formación de suelo de labor.
- Capacidad para admitir aguas residuales, purines y otros líquidos o residuos.

La separación de los agregados se realiza por medios químicos, mecánicos o ultrasónicos.

La separación de las distintas fracciones cuando es realizada por análisis mecánico es el más común, implica dos pasos fundamentales:

- Dispersión de la muestra de suelo, es decir, separación en las partículas primarias, paso que lleva asociado: la eliminación de la materia orgánica que posee la muestra a analizar, porque la materia orgánica se adhiere a todas las partículas minerales, particularmente a la arcilla y dificulta su posterior dispersión; la eliminación de los ligandos, los puentes que tienen unidas a las partículas y la desagregación o dispersión de los agregados.
- Separación y determinación de la cantidad de partículas individualizadas.

Las fracciones mayores (>0.05 mm) se separan por tamizado (en húmedo para separar la fracción arena del resto y en seco cuando se separan arena gruesa y fina).

Las fracciones más pequeñas (limo y arcilla) se separan por sedimentación mediante dos posibles métodos (el método del densímetro o el de la pipeta), basándose en la Ley de Stokes que determina la velocidad de sedimentación de una partícula en un líquido en función de su densidad, su tamaño, así como de la viscosidad y densidad del líquido.

Las combinaciones posibles de los porcentajes de arcilla, limo y arena obtenidos, se pueden agrupar en unas pocas clases de tamaños de partículas o clases texturales. Los triángulos de textura/diagramas triangulares son el método de representación más utilizado; normalmente se utilizan diagramas texturales según un triángulo equilátero, pero con un número de clases diferentes que oscilan entre los 12 de la USDA y las 3 de la FAO.

La fracción arcilla resulta la más importante a la hora de valorar el comportamiento de un horizonte; y por lo tanto del propio suelo. Así mismo es más determinante que el resto de fracciones en cuanto a la respuesta de las plantas.

3.3 MATERIAL & METODOS

Las propiedades generales analizadas fueron pH, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de saturación de bases y distribución de las fracciones granulométricas.

3.3.1 pH

El pH del suelo se puede medir tanto en agua como en solución de cloruro potásico. El medido en agua destilada se denomina pH actual, expresando la cantidad de H^+ en la solución del suelo, sin tener en cuenta los iones ácidos existentes, ya que no contabiliza los fijados sobre el complejo de cambio (ión H^+ y Al^{3+}). Éstos se miden en KCl, conocido por pH potencial; puesto que mide la acidez (potencial) del suelo donde el K^+ se intercambia en el complejo de cambio por los iones ácidos. Esto hace que existan diferencias entre los dos métodos; siendo por lo general la medida de agua entre 0.5 – 1.5 unidades superior al medido con KCl. En este estudio se utilizó la medida del pH en agua destilada. La determinación de pH se realizó mediante un pH-metro en una suspensión de suelo 1:2.5 (MAPA, 1995):

- pH (H_2O) – pH actual: 10g de suelo suspendidos 25 mL de agua destilada, esperando 10 min antes de realizar la medida.

Durante la medida se removió la mezcla con el fin de evitar el efecto “Pallman” o de suspensión del líquido sobrenadante, que daría un valor superior al verdadero.

3.3.2 Materia Orgánica

La determinación de cantidad de materia orgánica en suelos se basa en su oxidación a CO_2 mediante iones dicromato, en un medio altamente ácido (RAIJ *et al.*, 2001).

Las muestras fueron primeramente secadas a 65°C y tamizadas a 0.09 mm. El contenido de carbono orgánico fue medido mediante digestión húmeda según el método de WALKLEY – BLACK. Este proceso adaptado por RAIJ, *et al.* (2001), basado en la digestión húmeda sin calentamiento a lo que sigue una determinación colorimétrica.

Se colocó 1 g de la muestra de suelo en un matraz Erlenmeyer de 100 mL y se añadió 10 mL de la mezcla de dicromato (0.667 mol L⁻¹ dicromato de potasio diluido en 5 mol L⁻¹ de ácido sulfúrico). Este matraz fue removido durante 10 minutos a 180 rpm utilizando un agitador circular horizontal y se dejó enfriar la muestra.

Después de dejarlo reposar 1 h, se añadieron 50 mL de agua para enfriar la reacción. Se dejó reposar durante la noche (12h) y se separó del vertido la solución sobrenadante por decantación.

Después de la decantación, la determinación por colorimetría se llevó a cabo mediante los cambios de color que resultan de la presencia de Cr⁺³ de la solución sobrenadante decantada. El colorímetro mide la transmitancia de luz a longitudes de onda de 600 nm.

La cuantificación por este método requiere una comparación de la transmitancia frente a una curva estándar, que se preparó mediante trituración con la solución de sal de Mohr. El contenido de C orgánico (CO) se obtuvo utilizando un factor de corrección, (f = 1.33), lo que representa la oxidación incompleta (RAIJ *et al.*, 2001).

3.3.3 Capacidad de intercambio catiónico

La C.I.C. se refiere al número de enlaces negativos del complejo coloidal. Mediante el conocimiento de los contenidos de arcillas y de la riqueza de materia orgánica en el suelo, se puede cualificar la composición del coloide y relacionarla con la C.I.C. (COBERTERA, 1993). La CIC variará en el suelo en función del horizonte analizado dependiendo del

contenido y tipo de arcilla y de componentes orgánicos presentes en los mismos (PORTA *et al.*, 1999). Se ha seguido el método del acetato amónico 1N a pH 7 descrito en MAPA (1994), de forma que el amonio desplaza a todos los cationes de las posiciones de cambio. El exceso de amonio se lava con alcohol, a continuación se realiza una segunda percolación con NaCl, desplazándose los iones amonio por el sodio.

3.3.4 Análisis granulométrico

La textura es consecuencia de la composición granulométrica, es decir, el porcentaje de materiales de distinto tamaño de partícula (COBERTERA, 1993). La distribución del tamaño de las partículas va a influir en propiedades del suelo tales como la permeabilidad, plasticidad, capacidad de absorción,...etc. (IHOBE, 1994; PORTA *et al.*, 1999). La separación de las muestras en fracciones granulométricas se realiza siguiendo el método internacional según describen GUTTIAN & CARBALLAS (1976) y CAMARGO *et al.*, (1986), consistiendo en que se parte del suelo seco al aire, sobre el que se realiza una oxidación de la materia orgánica con peróxido de hidrógeno, una eliminación de los agentes ligantes con ácido clorhídrico y luego una dispersión con hexametáfosfato sódico, con la finalidad de individualizar las partículas de arcilla integradas en flóculos. Para la separación de las diferentes fracciones granulométricas se requiere primeramente un tamizado de las muestras, con la finalidad de separar la fracción de arena (>de 0.05 mm) de las restantes, limo y arcilla. Ambas se separan por sedimentación, basada en la ley de Stokes, que estudia la velocidad de sedimentación de una partícula en un líquido, teniendo en cuenta la densidad y tamaño de la partícula, así como la viscosidad y densidad del líquido, usando para ello una pipeta Robinson.

3.3.5 Porcentaje de saturación de bases

Se determinan los contenidos de Ca ($\text{mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$), Mg ($\text{mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$), K ($\text{mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$) y Na ($\text{mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$); determinándose la transferencia de Ca, Mg, K y P a la resina intercambiadora de iones en medio acuoso, posteriormente es realizada la separación de la resina del suelo y extracción de los elementos de la resina con una solución ácida de cloruro de sodio (RAIJ *et al.*, 2001).

3.4 RESULTADOS & DISCUSIÓN

A continuación, se muestran los resultados del análisis estadístico de las propiedades generales del suelo para las profundidades 0-20 cm, >20 cm y Horizonte A que se obtuvo por ponderación según la profundidad exacta del Horizonte A, del suelo estudiado.

3.4.1 Profundidad de muestreo 0-20 cm

En la Tabla 3.3 se muestra la información estadística de las propiedades estudiadas para esta profundidad.

Prop	Unidades	N	Media	Mediana	Moda	σ	Asimetría	Curtosis	Min	Max	C.V.
MO	g/kg	80	67.56	67.00	67.00	6.20	-0.40	-0.02	51.00	79.00	9.2
pH		80	4.41	4.40	4.50	0.20	0.11	-0.01	3.90	4.90	4.6
P	mg/kg	80	41.05	38.00	30.00	15.71	0.67	0.33	12.00	85.00	38.27
Ca	mmol/kg	80	22.95	22.00	25.00	5.63	0.42	0.64	7.00	36.00	24.51
Mg	mmol/kg	80	1.08	1.00	0.80	0.26	0.46	-0.66	0.60	1.70	24.26
K	mmol/kg	80	1.58	1.55	1.00	0.66	0.99	1.62	0.50	3.80	41.54
Al	mmol/kg	80	8.95	9.00	10.00	3.15	0.22	-0.04	3.00	17.00	35.15
H+Al	mmol/kg	80	127.88	121.00	121.00	20.53	0.34	0.03	80.00	185.00	16.06
SB	mmol/kg	80	25.61	25.10	23.20	5.75	0.38	0.81	8.90	40.00	22.45
CIC	mmol/kg	80	153.47	150.60	144.30	17.79	0.31	-0.06	114.70	193.60	11.59
V	%	80	17.04	17.00	17.00	4.79	0.59	0.75	5.00	31.00	28.1
Arcilla	%	80	17.23	16.80	20.60	2.83	0.41	-0.61	12.20	23.90	16.4
Limo	%	80	30.82	30.65	28.30	4.09	-0.23	0.21	18.90	40.20	13.3
Arena	%	80	51.95	52.80	48.00	6.24	-0.28	-0.56	36.30	64.40	12.0
Grava	%	80	21.03	19.00	9.00	13.17	0.57	-0.44	0.00	58.00	62.6

Tabla 3.3. Resultados estadísticos de las propiedades generales a la profundidad 0-20cm (N=número de muestras; Media, Mediana, Moda, σ =desviación típica; Asimetría, Curtosis, Min=Mínimo, Max=Máximo, C.V= coeficiente de variación).

El pH medio del suelo estudiado es extremadamente ácido (4.41) con un intervalo de variación no de 3.90 a 4.90; siendo 45 muestras extremadamente ácidas y 35 muy fuertemente ácidas. Según varios autores como GUTIÁN OJEA (1956, 1960) y FUENTES YAGÜE (2002) una de las causas más frecuentes de acidificación del suelo, es el lavado de Ca en zonas de alta pluviometría; en España los suelos ácidos son predominantes en las zonas húmedas Asturias y Galicia (también en Extremadura y Huelva debido a la naturaleza de la roca madre). MACIAS VÁZQUEZ & CALVO de ANTA (1992) sostienen que en suelos de Galicia es habitual encontrar pH en torno a 4.5 e incluso más bajos; en suelos derivados de filitas, esquistos o rocas graníticas. El pH presenta el menor coeficiente de variación de los parámetros estudiados (< al 5%), si bien hay que tener en cuenta que siendo el pH un valor logarítmico (una variación de una unidad supone una diferencia de $[H^+]$ de 10 unidades), la variabilidad del pH ha de ser mucho mayor.

Respecto a la materia orgánica (MO) es considerada un factor de calidad del suelo; el contenido medio de las muestras es medio-alto de $67.56 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ y su coeficiente de variación 9.18%. Según LEMA (1998) los contenidos en MO de los suelos de Galicia se sitúan entre $40\text{-}60 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$. Si bien INIA (2005) estudió el contenido medio de los suelos en España, encontrando un valor medio en los suelos agrícolas de Galicia de $34.48 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$. Los valores en suelos forestales en Galicia se sitúan entre $80\text{-}100 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$ (LEMA, 1998) principalmente debido al manejo que sufren los suelos cultivados que puede desequilibrar el contenido orgánico que tendría el suelo en condiciones naturales (ULLOA GUTIÁN, 2002). Si bien no es el contenido de MO lo más importante, sino la velocidad de transformación de la misma (FUENTES YAGÜE, 2002). Un suelo adecuado es aquel en el que la humificación y la mineralización se mantienen en equilibrio (SIQUEIRA, 2009). Este equilibrio va a depender de la actividad biológica que en él se desarrolla y esta es a su vez función de las condiciones climáticas (temperatura y humedad), edáficas (porosidad, textura, estructura, permeabilidad, pH, contenido mineral, etc.) y de cultivo (URBANO TERRÓN, 1999).

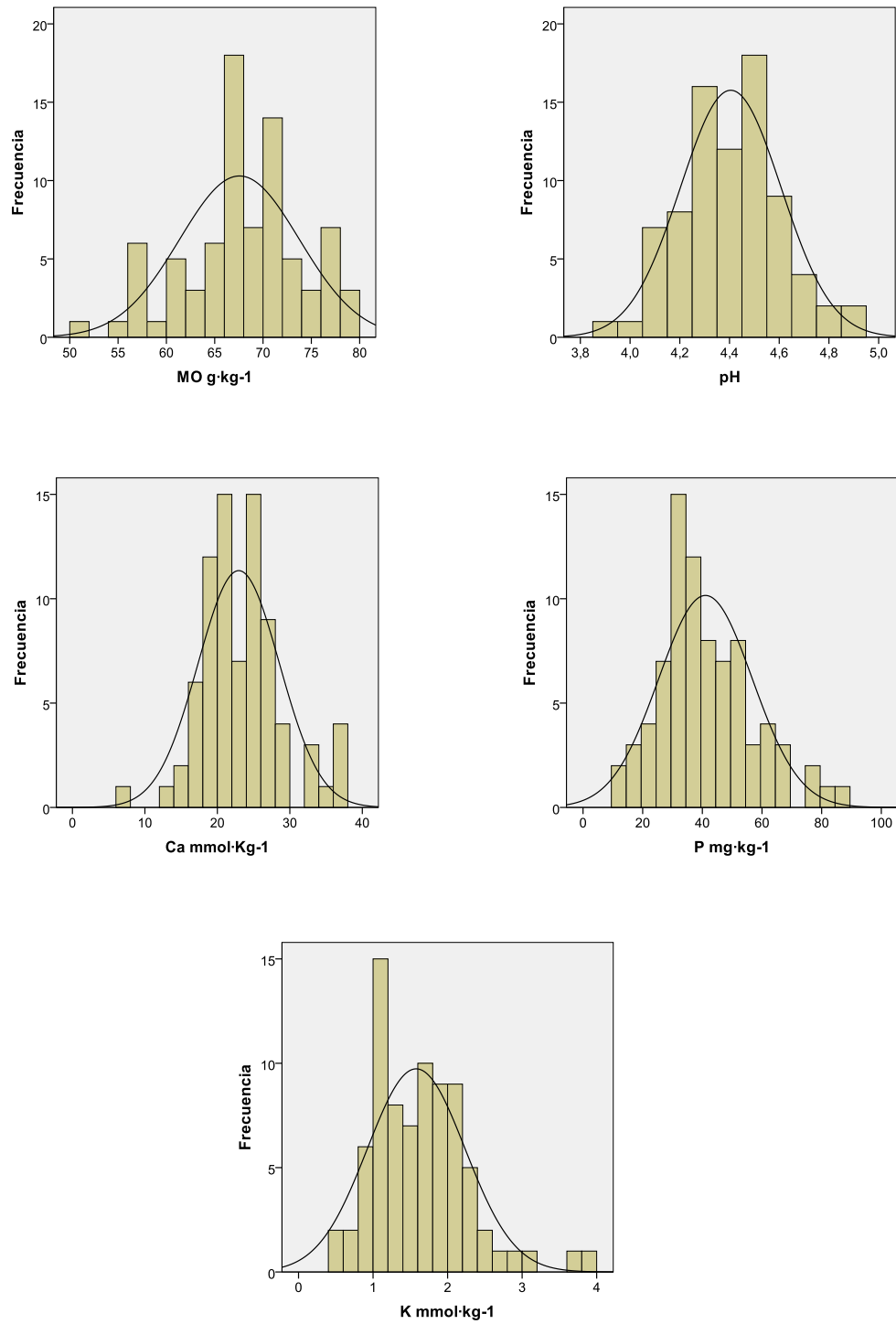


Figura 3.2.- Histogramas del contenido de materia orgánica, pH, Calcio, Fósforo y Potasio.

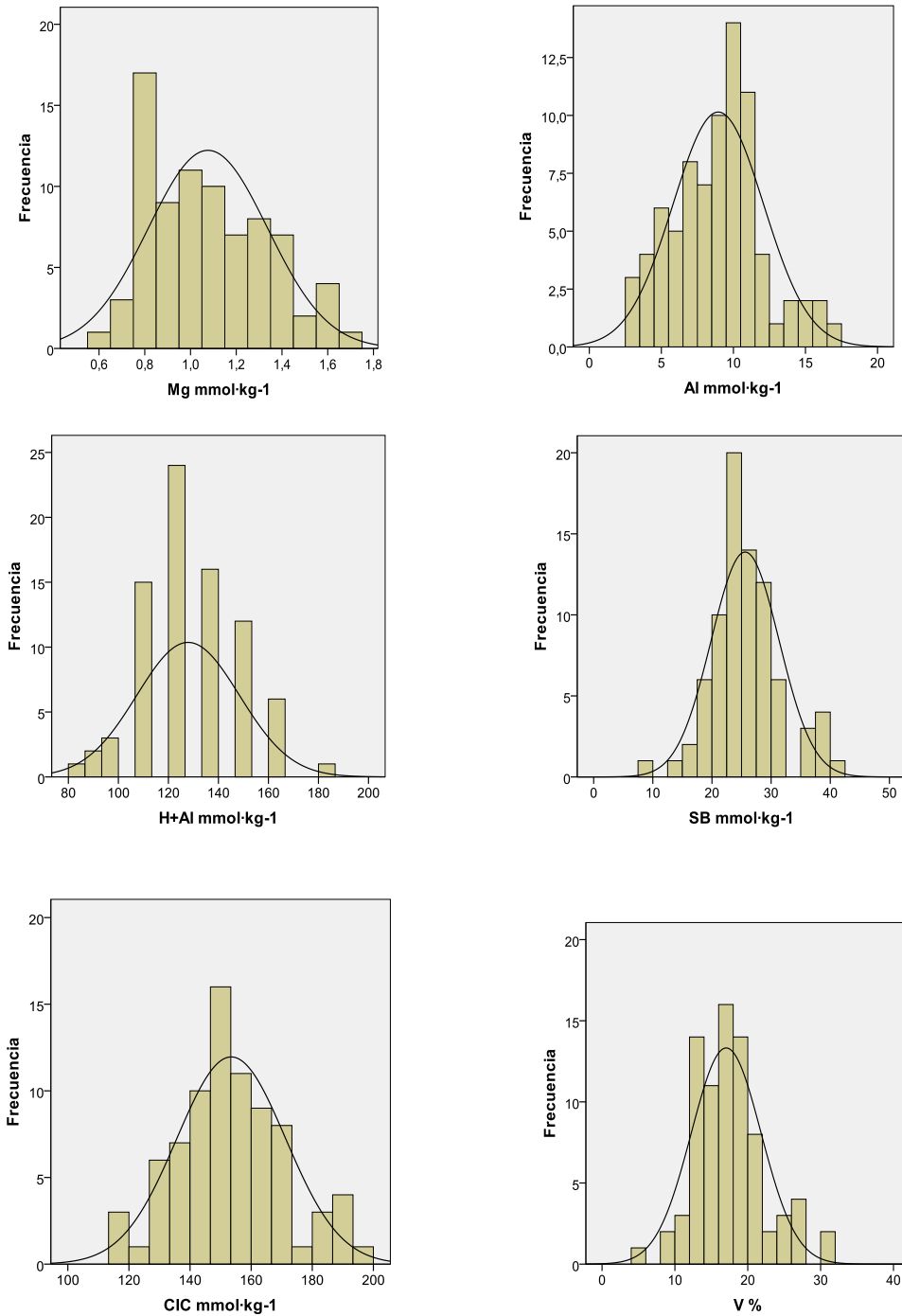


Figura 3.3.- Histogramas del magnesio, aluminio, acidez de cambio, suma de bases, capacidad de intercambio catiónico y porcentaje de saturación de bases.

El P presenta un valor medio de $41.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, situándose en un intervalo de 12 – $85 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. El Ca presenta un valor medio de $22.95 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, con un intervalo de variación entre 7 – $36 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. Estos valores bajos del Ca explican la acidez del pH del suelo objeto de estudio.

El Mg del suelo estudiado tiene un valor medio de $1.08 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, siendo el intervalo $0.60 - 1.70 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$.

El contenido de potasio (K) en el suelo estudiado tiene un valor medio de $1.58 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ con un intervalo de $0.6 - 1.70 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ y un coeficiente de variación medio de 41.54%. El histograma de la distribución de frecuencias del K puede observarse en la Figura 3.2. Según CALVO *et al.* (1992) los suelos de Galicia presentan en general bajos contenidos de K. En 2002, LÓPEZ MATEO *et al.* estudian el contenido de K en los suelos de Galicia, indicando que en los suelos de Galicia los contenidos de K no cambiable son considerablemente más altos que los contenidos de K soluble y de cambio (en mayor o menor medida en función del material de partida). El K no cambiable, poco disponible para las plantas puede considerarse una reserva de fertilidad a medio plazo.

El contenido medio de Aluminio (Al) en las muestras de suelo es de $80.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ moviéndose en un intervalo de $26.97-152.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, con un coeficiente de variación de 35.15%. Podemos ver la distribución de frecuencias en la Figura 3.3. Las acidez de los suelos de Galicia, (debido principalmente al clima húmedo y su geología de naturaleza ácida) hace que el Al “domine” el complejo de cambio respecto a Ca, Mg o K (FERNANDEZ MARCOS *et al.*, 1994). Por ello los contenidos de Al en los suelos de Galicia son elevados, como así lo es en el área de estudio. A pH inferiores a 5, el Al aumenta su solubilidad y puede aparecer en formas tóxicas para plantas y microorganismos, lo que hace que sea necesario recurrir al encalado corrigiendo la acidez y eviten este riesgo.

El valor medio de la acidez de cambio $\text{H}+\text{Al}$, en el área de estudio es $127.88 \text{ mmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$, situándose las medidas en un intervalo de $80 - 185 \text{ mmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$ con un coeficiente de variación (CV) de 16.06%. Los valores son elevados debido al bajo valor del pH del suelo estudiado. La suma de bases (SB) presenta un valor medio de $522.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ con un coeficiente de variación de 21.70%. La capacidad de intercambio catiónico (CIC),

indica las cargas positivas del suelo; los cationes que puede mantener de forma intercambiable. En el estudio el valor medio es de $153.47 \text{ mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ y su coeficiente de variación es de 11.59%. Son valores considerados bajos debidos a la pérdida de MO por el cultivo (PAZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2000). El porcentaje de saturación de bases (V%) presenta un valor medio de 17.04%, en un intervalo de 5-31%, con un coeficiente de variación de 28.12%.

Respecto a la textura del suelo; de las 80 muestras obtenidas a la profundidad de 0-20 cm 37 resultaron franca y 43 franco-arenosa. En el suelo objeto de estudio el contenido en arena es el mayoritario con un valor medio de 51.95%, mientras que el limo alcanza un valor medio de 30.82% y la arcilla aparece en menor medida, con valor medio de 17.23%. La arena, la arcilla y el limo presentan coeficientes de variación (CV) bajos, 12.01%, 16.41%, y 13.26%. El porcentaje de gravas del suelo es de 21.03% siendo su coeficiente de variación (CV) elevado, 62.63%. La distribución de frecuencias de estas cuatro propiedades aparece en la Figura 3.4.

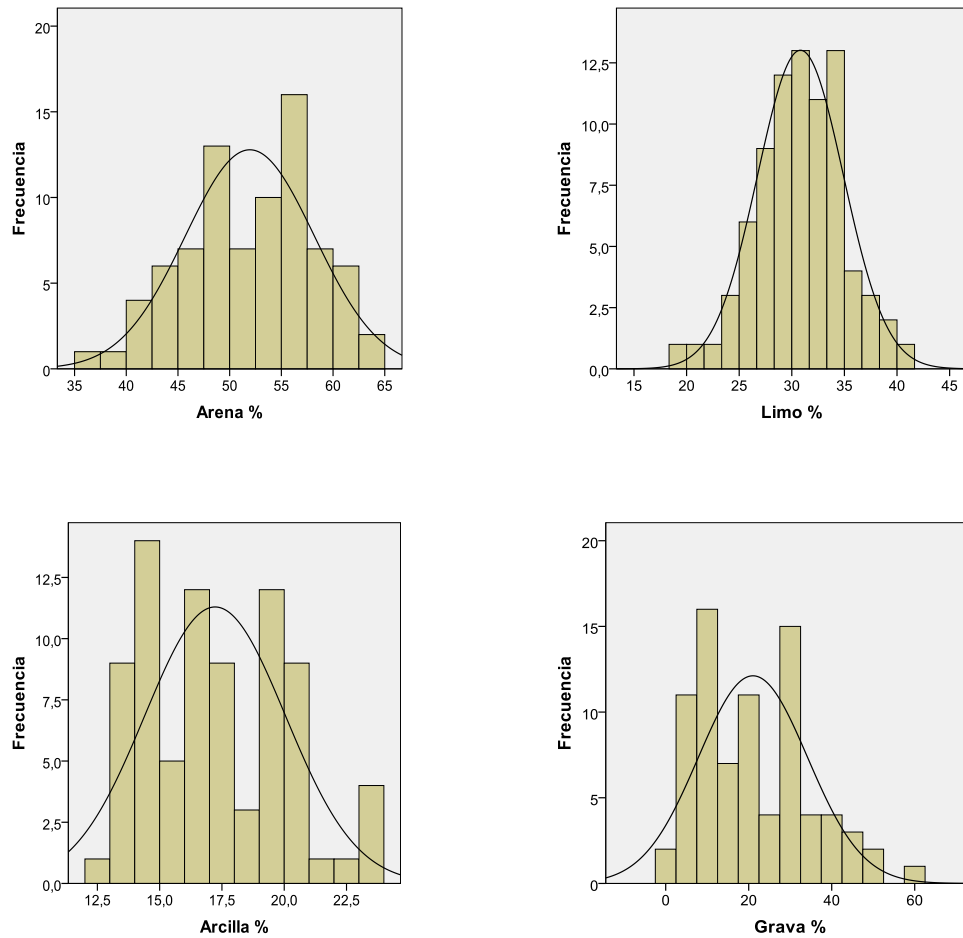


Figura 3.4.- Histogramas del porcentaje de arena, limo, arcilla y grava.

Los coeficientes de variación pueden darnos una primera aproximación de la variabilidad de las propiedades generales, para interpretar estos resultados algunos autores (GOMES, 1984; CAMBARDELLA *et al.*, 1994) consideran que la variabilidad estadística es baja cuando los coeficientes de variación son inferiores al 10%, media si están comprendidos entre 10-25% y alta si es superior al 30%. WARRICK & NIELSEN (1980) por su parte clasifican los coeficientes de variación (CV) de otro modo: $CV \leq 12$, bajos; CV 12-60 % medios y los $CV \geq 60\%$, altos. Para el caso del pH el coeficiente de variación es bajo (inferior al 5%) así como el de contenido en materia orgánica (MO) (inferior al 10%); para el Ca, P, Mg, K, H+Al, V, SB y CIC los coeficientes de variación son medios; y son altos para el caso del Al. En el caso de las fracciones granulométricas los coeficientes de

variación se sitúan en un valor medio (entre 12-16%) y el coeficiente de variación de la grava es el mayor de las propiedades estudiadas, superior al 60%. La clasificación de los coeficiente de variación de menor a mayor de las propiedades generales es: pH<MO<CIC<H+Al<SB<Mg<P<V<Al<K y para las fracciones granulométricas: arena<limo<arcilla<grava.

Según los valores de asimetría y curtosis se de los estos elementos, y atendiendo a la forma de los histogramas de distribución de frecuencias (Figura 3.2, Figura 3.3 y Figura 3.4) podemos asumir la normalidad de los datos de todas las propiedades estudiadas salvo para el caso de la acidez de cambio (H+Al).

En la Tabla 3.4 se muestra la matriz de correlaciones entre las propiedades generales estudiadas.

Propiedad	MO	pH	P	Ca	Mg	K	Al	H+Al	SB	CIC	V	Arcilla	Limo	Arena	Grava
MO	1	0.32**										-0.24*			
pH		1	-0.23*	0.67**	-0.26*		-0.70**	-0.76**	0.65**	-0.66**	0.78**				
P			1		0.38**	0.26*				0.25*					
Ca				1			-0.76**	-0.59**	0.99**	-0.35**	0.91**	0.23*			
Mg					1		0.22*								
K						1	0.30**					0.24*	0.28*	-0.29**	
Al							1	0.74**	-0.76**	0.60**	-0.82**				
H+Al								1	-0.57**	0.96**	-0.83**				
SB									1	-0.33**	0.91**	0.25*			
CIC										1	-0.66*				
V											1				
Arcilla												1	0.6**	-0.86**	
Limo													1	-0.93**	
Arena														1	
Grava															1

Tabla 3.4. Matriz de correlación de las propiedades generales (* nivel de significación para $p<0.05$; ** nivel de significación para $p<0.01$).

La MO presenta una correlación altamente significativa ($p<0.01$) con el pH, con un coeficiente de correlación bajo ($r=0.32$), y otra negativa con la arcilla únicamente significativa ($p<0.05$) ($r=-0.24$). Por su parte el pH presenta correlaciones altamente significativas y negativas con el Ca, Al, acidez de cambio (H+Al) y capacidad de

intercambio catiónico (CIC), tienen las cuatro coeficientes de correlación moderados, ($r=0.67$, $r=-0.70$, $r=-0.76$ y $r=-0.66$ respectivamente); y altamente significativas y positivas con la suma de bases (SB) y porcentaje de saturación de bases (V), también con coeficientes de correlación moderados, superiores a 0.65. Por otro lado el pH presenta una correlación negativa únicamente significativa y débil con el K inferior ($r=-0.26$). El Ca se correlaciona de forma altamente significativa con el Al, H+Al, SB y V; las dos primeras en sentido negativo y con coeficientes moderados ($r=-0.76$ y $r=-0.59$ respectivamente) y en sentido positivo y con las dos siguientes con coeficientes altos ($r=0.99$ y $r=0.91$). El P por su parte tiene como correlación más destacada la que aparece con el Mg, siendo de altamente significativa de sentido positiva y con coeficiente de correlación $r=0.38$. El K, presenta una correlación positiva altamente significativa con el Al con un coeficiente de correlación de 0.30. El Al, presenta correlaciones positivas y altamente significativas con la acidez de cambio (H+Al), capacidad de intercambio catiónico (CIC), ambas con coeficientes de correlación superiores a 0.60 y correlaciones negativas y altamente significativas con la suma de bases (SB) y el porcentaje de saturación de bases (V), las dos con coeficientes fuertes, ($r=-0.76$ y $r=-0.82$). La acidez de cambio (H+Al) presenta correlaciones altamente significativas y de sentido negativo, con la suma de bases (SB), con un coeficiente moderado cercano a -0.60, y con el porcentaje de saturación de bases (V) con un coeficiente alto, ($r=-0.80$). Además una correlación altamente significativa y de sentido positivo fuerte, con la capacidad de intercambio catiónico (CIC), cuyo coeficiente de correlación es de $r=0.96$. La suma de bases (SB) tiene correlación positiva altamente significativa y fuerte, con el porcentaje de saturación de bases (V), con un coeficiente superior a 0.90 y una correlación (débil) altamente significativa y de sentido negativo con la capacidad de intercambio catiónico (CIC), con un coeficiente de correlación de $r=-0.33$. También tiene una correlación únicamente significativa positiva y débil con la arcilla ($r=0.25$). La arcilla presenta correlaciones altamente significativas positiva y moderada con

el limo ($r= 0.62$) y negativa fuerte con la arena ($r=-0.86$). El limo por su parte presenta una correlación altamente significativa negativa y fuerte ($r= -0.93$) con la arena.

Análisis de componentes principales

	CPG1	CPG2	CPG3	CPG4
Autovalores	5.385	2.891	1.287	1.130
Proporción Varianza	0.414	0.222	0.099	0.087
Varianza acumulada	0.414	0.637	0.736	0.823
Variables del CP				
MO	0.052	-0.138	0.676**	-0.644**
pH	0.855**	-0.056	0.095	-0.350**
Ca	0.881**	0.134	0.159	0.281*
Mg	0.211	0.398**	0.478**	0.204
K	-0.268*	-0.121	0.570**	0.181
Al	-0.875**	0.205	0.000	-0.196
H+Al	-0.873**	0.221*	0.208	0.213
SB	0.853**	0.166	0.232*	0.319*
CIC	-0.718**	0.310**	0.315**	0.343*
V	0.975**	-0.017	0.042	0.108
Arcilla	0.152	0.865**	-0.195	0.071
Limo	0.060	0.881**	0.019	-0.305*
Arena	-0.108	-0.969**	0.076	0.168
Correlaciones CPsSuelo, altura, CEaV, CEaH y CPsTopografía				
Altura	0.255*	-	0.282*	-0.386**
CEaV	-	0.409**	-0.325**	0.459**
CEaH	-	0.313**	-0.359**	0.227*
CPT1	-	-	-	-0.300**
CPT2	-0.226*	-	-	-

Tabla 3.5. Componentes Principales de las propiedades generales a profundidad 0-20cm

(* nivel de significación para $p<0.05$; ** nivel de significación para $p<0.01$).

En la Tabla 3.5 se muestra es análisis de componentes principales realizado de las propiedades generales de la zona de estudio, excepto para el P obtenido mediante resina. Se observa que el 82% de la variabilidad de los datos (de las propiedades generales) quedan explicados mediante cuatro componentes principales (CPG) con autovalores superiores a 1.

Otros autores (p.e. OFFICER *et al.*, 2003; DE ASSIS *et al.*, 2010) han utilizado el análisis de componentes principales en el estudio del suelo. El primer componente, **CPG₁**, explica el 41% de la variabilidad total de los datos, en el cual, el pH, el Ca, el Al, H+Al, SB, CIC y V son los elementos destacados. Por tanto en el CPG₁, el pH y las variables del complejo de cambio están asociadas entre sí, pero no intervienen ni la MO ni las fracciones texturales. Además, en el CPG₁ se observa que el pH participa con signo positivo, al igual que Ca, SB y V, de forma que al aumentar el valor de una de estas variables aumenta el pH (y viceversa). Por el contrario aparecen con signo negativo Al, H+Al y CIC cuyo valor disminuye al aumentar pH, Ca, SB y V. Estos resultados corroboran las correlaciones lineales obtenidas entre el pH y dichas propiedades de cambio.

El **CPG₂** explica un 22% adicional de la variabilidad, siendo en este caso las fracciones granulométricas los elementos de mayor peso en el componente (Mg y CIC contribuyen en una menor medida) confirmando que no hay correlaciones importantes con el resto de propiedades. Como era esperado, la fracción fina y la fracción gruesa tienen signos opuestos.

El tercer componente (**CPG₃**), en el cual destacan principalmente la MO, el K, el Mg, la SB; y en una menor medida la CIC; explica un 10% más de la variabilidad. Todos estos elementos y propiedades contribuyen con signo positivo al componente.

El **CPG₄** explica casi un 9% adicional de la variabilidad; siendo la MO y el pH las propiedades de mayor peso, asociadas con signo negativo. Cabe destacar el signo de la CIC contrario a la MO, un resultado no esperado, esta relación se explicará en el estudio de la variabilidad espacial del suelo.

El CPG₁ no presenta correlaciones altamente significativas ni con la altura, CE_aV, CE_aH, ni con los componentes principales de la topografía (CPT₁ y CPT₂). El CPG₂ se

correlaciona con alta significación con la CE_aV y la CE_aH en sentido positivo con unos coeficientes de correlación $r=0.41$ y $r=0.31$ respectivamente. El CPG_3 presenta correlaciones altamente significativas con la CE_aV y la CE_aH , de sentido negativo $r=-0.325$ para el caso de la CE_aV y $r=-0.359$ para el caso de la CE_aH . En el último de los componentes, el CPG_4 , tiene correlaciones altamente significativas, con la altura ($r=-0.386$), la CE_aV ($r=0.469$ y el CPT_1 ($r=-0.300$).

3.4.2 Profundidad de muestreo >20 cm

En la Tabla 3.6 se muestra la información estadística de las propiedades estudiadas para esta profundidad.

Prop	Unidades	N	Media	Mediana	Moda	σ	Asimetría	Curtosis	Min	Max	C.V.
MO	g/kg	80	60.13	60.00	67.00	6.20	-0.02	-0.34	40.00	77.00	13.43
pH		80	4.39	4.40	4.50	0.20	0.32	-0.53	4.00	4.80	4.30
P	mg/kg	80	19.65	18.00	14.00	7.88	0.99	0.80	7.00	45.00	40.10
Ca	mmol/kg	80	27.64	28.00	22.00	8.12	0.22	0.01	8.00	49.00	29.36
Mg	mmol/kg	80	1.08	1.00	1.00	0.64	1.44	2.30	0.20	3.00	59.60
K	mmol/kg	80	0.72	0.60	0.60	0.30	1.43	1.88	0.30	1.60	41.41
Al	mmol/kg	80	6.55	6.00	4.00	3.36	0.46	-0.40	1.00	15.00	51.24
H+Al	mmol/kg	80	80.93	80.00	72.00	20.53	0.28	1.32	18.00	135.00	23.50
SB	mmol/kg	80	29.37	29.55	32.70	7.89	0.32	-0.01	12.10	50.40	26.87
CIC	mmol/kg	80	110.22	105.60	105.50	17.79	0.60	0.31	60.80	159.00	16.91
V	%	80	27.18	25.00	23.00	4.79	1.54	6.28	10.00	70.00	32.11
Arcilla	%	80	16.66	15.90	14.90	2.83	0.63	-0.60	12.60	22.80	16.05
Limo	%	80	28.33	27.60	26.00	4.09	0.22	-0.31	16.10	41.00	18.16
Arena	%	80	55.01	55.75	51.40	6.24	-0.32	-0.66	36.80	67.30	12.41

Tabla 3.6. Resultados estadísticos de las propiedades generales a la profundidad >20cm (N=número de muestras; Media, Mediana, Moda, σ =desviación típica; Asimetría, Curtosis, Min=Mínimo, Max=Máximo, C.V= coeficiente de variación).

En cuanto a los coeficientes de variación a esta segunda profundidad estudiada para el caso del pH el coeficiente de variación es bajo 4.3% (inferior al 5%); mientras que para la MO, H+Al, SB y CIC los coeficientes de variación son medios; y son altos para el caso del K, Al y V. En el caso de las fracciones granulométricas los coeficientes de variación se sitúan en un valor medio (entre 12-18%). La clasificación del coeficiente de variación de

menor a mayor es: $\text{pH} < \text{MO} < \text{CIC} < \text{H} + \text{Al} < \text{SB} < \text{Ca} < \text{V} < \text{P} < \text{K} < \text{Al} < \text{Mg}$ y para la granulometría: arena < arcilla < limo. Ambas clasificaciones varían respecto a la profundidad 0-20 cm, en este caso el Mg tiene el mayor coeficiente de variación, algo que no ocurría en la primera profundidad (0-20 cm); mientras que en el caso de la granulometría a profundidad de >20 cm tienen unos coeficientes de variación entre 12.41 – 18.16%.

Según los valores de asimetría y curtosis de los estos elementos, y atendiendo a la forma de los histogramas de distribución de frecuencias (Figura 3.5, Figura 3.6 y Figura 3.7) podemos asumir la normalidad de los datos de todas las propiedades estudiadas salvo para el caso de la acidez de cambio (H+Al), el Mg y el K.

Comparando los contenidos de las muestras tomadas a profundidad de 0-20 cm y de >20 cm observamos que el pH se mantiene en niveles similares, con valores medios de 4.41 y 4.39 respectivamente. La valores medios de la MO también son similares, con unos valores de $67.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ a una profundidad de 0-20 cm frente a $60.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ para >20 cm. El Ca mantiene unos valores similares a los recogidos en la anterior profundidad, si bien son ligeramente superiores, $27.64 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ frente a $22.95 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ a profundidad 0-20 cm. El P baja considerablemente su concentración pasando de $41.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ en la profundidad 0-20 cm a $19.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ en >20 cm. El K en esta segunda profundidad muestreada baja de manera sensible respecto a la anterior profundidad. Los valores medios se sitúan en $0.72 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ frente a los $1.52 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ de la profundidad 0-20 cm. Mientras que el Mg presenta una concentración media igual en las dos profundidades, con un valor de $1.08 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$. El Al por su parte, presenta una menor concentración a profundidad >20 cm, concentración pasando de un contenido medio $8.95 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ en la profundidad 0-20 cm a $6.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

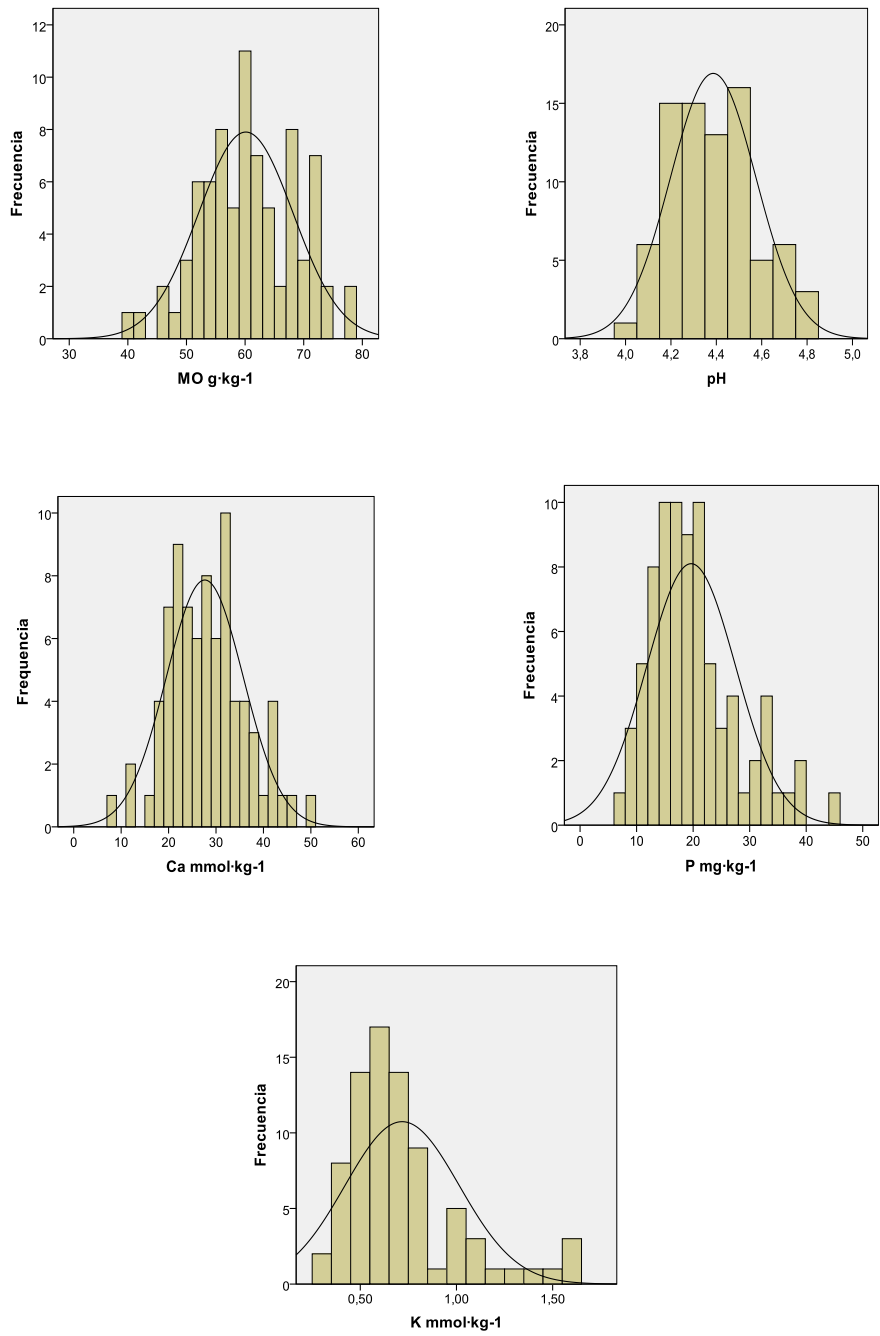


Figura 3.5.- Histogramas del contenido de materia orgánica, pH, Calcio, Fósforo y Potasio.

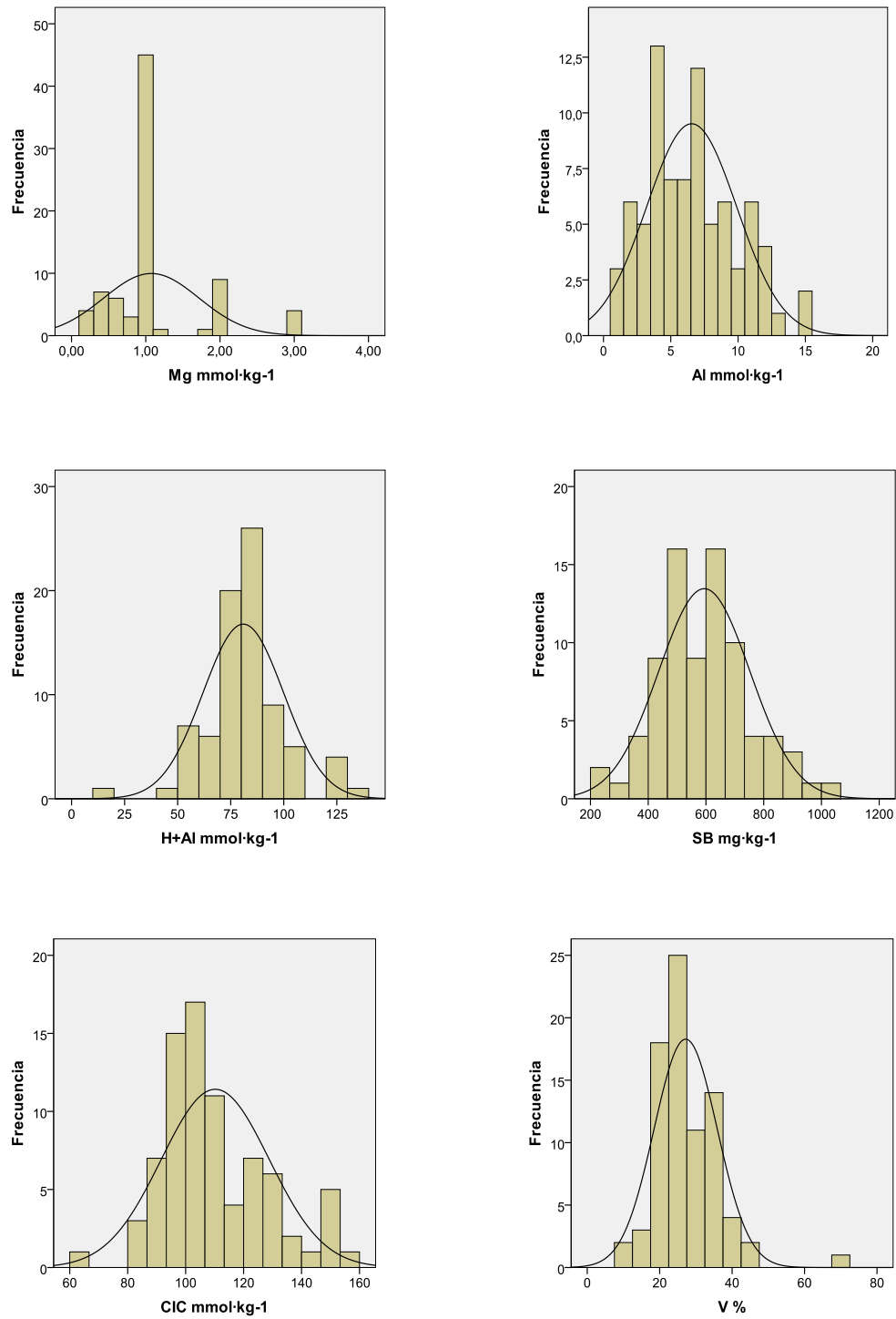


Figura 3.6.- Histogramas del magnesio, aluminio, acidez de cambio, suma de bases, capacidad de intercambio catiónico y porcentaje de saturación de bases.

La acidez de cambio (H+Al), la suma de bases (SB), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el porcentaje de saturación de bases (V) a la profundidad de >20 cm presenta cambios respecto a la profundidad 0-20 cm. Mientras que los valores medios H+Al y CIC son menores (pasando de 127.88 a 80.93 $\text{mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ y de 153.47 a 110.22 $\text{mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ respectivamente); la SB y el V aumentan (pasando de 25.61 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ a 29.37 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ y de 17.04% a 27.18%).

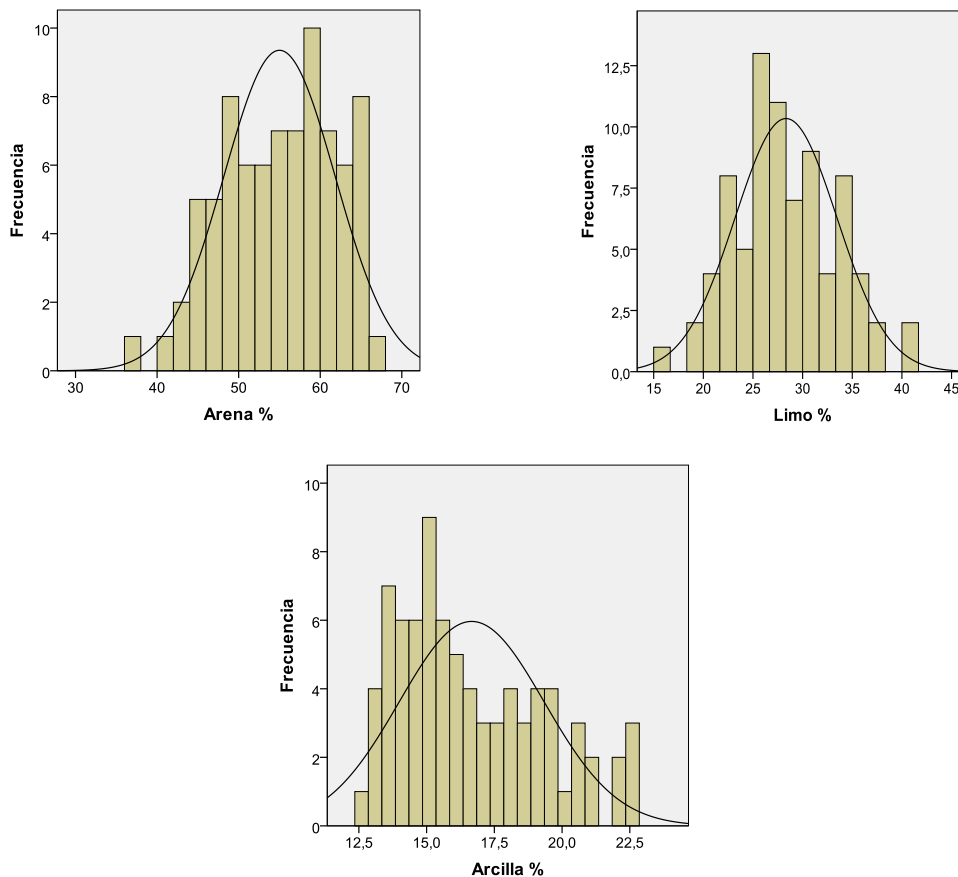


Figura 3.7.- Histogramas del porcentaje de arena, limo, arcilla.

En cuanto a la granulometría, las 80 muestras a profundidad >20 cm, 28 son francas y 42 franco-arenosa. El comportamiento es muy similar a la profundidad anteriormente estudiada: la arena aumenta aún más su presencia, pasando de un 51.95% en

los primeros 20 cm a un 55.01% en los 20 siguientes, el limo se baja ligeramente pasando de 30.82% a 28.33% y la arcilla prácticamente se mantiene igual 17.23% para 0-20 cm y 16.66%.

En la Tabla 3.7 se muestra la matriz de correlaciones entre las propiedades generales estudiadas.

Propiedad	MO	pH	P	Ca	Mg	K	Al	H+Al	SB	CIC	V	Arcilla	Limo	Arena
MO	1													
pH		1					-0.88**	-0.38**	0.64**		0.65**			
P			1											
Ca				1	-0.26*	-0.26*	-0.71**	-0.27*	0.99**		0.79**	0.23*		0.34**
Mg					1	0.24*	0.27*							
K						1								
Al							1	0.40**	-0.69**		-0.68**			
H+Al								1	-0.26*	0.91**	-0.74**			
SB									1		0.79**			
CIC										1	-0.42**			
V											1			
Arcilla												1	0.47**	-0.75**
Limo													1	-0.94**
Arena														1

Tabla 3.7. Matriz de correlación de las propiedades generales (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

Para esta profundidad la MO presenta una débil ($r = -0.22$) correlación negativa y únicamente significativa con el limo. El pH tiene dos correlaciones negativas altamente significativas, una fuerte ($r = -0.88$) con el Al; y otra débil ($r = -0.38$) con la acidez de cambio (H+Al) y dos correlaciones positivas altamente significativas con la suma de bases (SB) y el porcentaje de saturación de bases (V), ambas moderadas ($r = 0.64$ y $r = 0.65$) respectivamente. El Ca presenta múltiples correlaciones, siendo las más significativas, de sentido positivo las que tiene con la SB y V ($r = 0.99$ y $r = 0.79$) y de sentido negativo con el Al ($r = -0.71$). El Al presenta dos correlaciones negativas altamente significativas, las dos moderadas, $r = -0.69$, con la suma de bases (SB) y $r = -0.68$ con el porcentaje de saturación de bases (V). Además presenta una correlación positiva altamente significativa con la acidez de

cambio (H+Al) que podemos considerar baja ($r=0.40$). La acidez de cambio (H+Al) presenta una correlación positiva altamente significativa con la capacidad de intercambio catiónico (CIC), siendo esta fuerte ($r=0.91$), una correlación negativa altamente significativa con el porcentaje de saturación de bases (V) moderada ($r=-0.74$) y una correlación negativa únicamente significativa con la suma de bases (SB), débil ($r=-0.26$). La suma de bases (SB) por su parte presenta una correlación positiva altamente significativa con el porcentaje de saturación de bases (V), moderada ($r=0.79$). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) está correlacionada negativamente y con alta significación con el porcentaje de saturación de bases (V), siendo débil esta correlación ($r=-0.42$). Respecto a las fracciones granulométricas, la arcilla tiene una correlación altamente significativa y negativa con la arena (moderada, $r=0.75$) y otra altamente significativa positiva con el limo (moderada, $r=0.47$). Por último el limo tiene una correlación altamente significativa negativa muy fuerte ($r=-0.94$) con la arena.

Análisis de componentes principales

	CPG1	CPG2	CPG3	CPG4	CPG5
Autovalores	4.536	2.696	1.992	1.110	1.019
Proporción Varianza	0.349	0.207	0.153	0.085	0.078
Varianza acumulada	0.349	0.556	0.709	0.795	0.873
Variables del CP					
MO	0.012	-0.339**	-0.378**	-0.523**	0.544**
pH	0.840**	-0.043	0.107	0.067	0.194
Ca	0.859**	0.214	0.386**	-0.068	-0.015
Mg	-0.432**	0.363**	0.051	0.634**	-0.045
K	-0.283*	-0.039	0.048	0.504**	0.759**
Al	-0.885**	0.112	-0.138	-0.129	-0.136
H+Al	-0.606**	-0.135	0.757**	-0.150	0.078
SB	0.842**	0.234*	0.403**	-0.003	0.038
CIC	-0.265*	-0.030	0.945**	-0.150	0.085
V	0.889**	0.307**	-0.175	0.121	-0.007
Arcilla	-0.087	0.759**	-0.057	-0.248*	0.255*
Limo	-0.229*	0.863**	-0.033	-0.086	-0.016
Arena	0.207	-0.948**	0.047	0.162	-0.088
Correlaciones CPsSuelo, altura, CEaV, CEaH y CPsTopografía					
Altura	-	-	-	-0.241*	0.496**
CEaV	-	0.392**	0.250*	-	-0.226*
CEaH	0.131*	-	-	-	-0.235*
CPT1	-	-	-	-	0.341**
CPT2	-	-	-	-	-

Tabla 3.8. Componentes Principales de las propiedades generales a profundidad >20cm

(* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

En la Tabla 3.8 se muestra es análisis de componentes principales realizado de las propiedades generales de la zona de estudio. Se observa que el 87% de la variabilidad de los datos (de las propiedades generales) quedan explicados mediante cinco componentes principales (CPG) con autovalores superiores a 1.

El primer componente, **CPG₁**, explica el 35% de la variabilidad, en el cual, con la salvedad de la MO y la arcilla, el resto de propiedades estudiadas contribuyen en mayor o menor medida al CPG₁ (pH, Ca, Al, SB, y V con un peso en el componente mayor). Se asocian con signo negativo Mg, K, Al, H+Al, CIC y limo; y con signo positivo pH, Ca, SB y V. El **CPG₂** explica un 20% adicional de la variabilidad, siendo en este caso las fracciones granulométricas (arena, limo y arcilla) los principales elementos del componente (MO, Mg,

SB y V también contribuyen al componente con menor peso). La MO y la arena (el integrante de mayor peso en el componente) se asocian con signo negativo, frente al resto de propiedades (arcilla, limo, Mg, V y SB) que tienen signo positivo, la tendencia es por tanto que al aumentar la MO y la arena disminuyen éstas. El tercer componente (**CPG₃**), en el cual destaca la asociación positiva de la CIC, H+Al, SB y Ca, frente a la MO que muestra signo negativo; explica un 15% más de la variabilidad. El componente **CPG₄** explica un 8% adicional de la variabilidad, contribuyendo a este componente la MO, Mg, K y arcilla. El Mg y el K contribuyen con signo positivo al componente; por el contrario la MO y la arcilla lo hacen con signo negativo; con tendencia a disminuir cuando aumentan Mg y K. El último componente principal, **CPG₅**, explica casi un 8% adicional de la variabilidad de los datos. En este caso el K, la MO y la arcilla son los elementos con mayor peso en el componente, asociándose los tres con signo positivo.

El CPG₁ no presenta correlaciones altamente significativas ni con la altura, CE_aV, CE_aH, ni con los componentes principales de la topografía (CPT₁ y CPT₂). El CPG₂ se correlaciona con alta significación con la CE_aV en sentido positivo con un coeficiente de correlación $r=0.39$. El CPG₃ no presenta correlaciones altamente significativas ni con la altura, CE_aV, la CE_aH, ni con los componentes principales de la topografía (CPT₁ y CPT₂). El CPG₄ tampoco presenta correlaciones lineales con la altura, CE_aV, la CE_aH, ni con los componentes principales de la topografía (CPT₁ y CPT₂). El CPG₅ tiene correlaciones altamente significativas con la altura ($r=0.49$) y el CPT₁ ($r=0.34$).

3.4.3 Horizonte A

En la Tabla 3.9 se muestra la información estadística de las propiedades estudiadas, en este caso se incluyen las medidas de la conductividad eléctrica aparente del suelo, medidas en el dipolo vertical y horizontal.

Prop	Unidades	N	Media	Mediana	Moda	σ	Asimetría	Curtosis	Min	Max	C.V.
CE _{a-v}	mS/m	80	10.72	10.70	6.72	1.72	0.18	-0.49	6.72	14.67	16.04
CE _{a-H}	mS/m	80	7.94	7.87	7.53	0.75	0.35	0.04	6.40	9.86	9.39
MO	g/kg	80	64.37	64.68	60.90	6.57	-0.30	0.29	46.29	78.00	10.21
pH		80	4.40	4.40	4.30	0.17	0.32	0.09	4.01	4.87	3.89
P	mg/kg	80	31.77	29.94	33.38	10.54	0.47	-0.09	12.44	61.03	33.18
Ca	mmol/kg	80	25.03	24.75	18.00	6.04	0.21	0.11	8.46	38.00	24.15
Mg	mmol/kg	80	1.33	1.24	1.00	0.58	1.34	2.74	0.46	3.43	43.19
K	mmol/kg	80	0.92	0.91	0.91	0.21	0.39	-0.53	0.57	1.47	22.60
Al	mmol/kg	80	7.91	8.07	4.05	2.92	0.26	0.00	2.05	15.56	36.95
H+Al	mmol/kg	80	107.98	106.93	91.47	14.86	0.20	0.53	65.06	153.24	13.76
SB	mmol/kg	80	27.28	27.18	20.27	5.99	0.23	0.25	10.07	41.13	21.97
CIC	mmol/kg	80	135.23	134.08	160.76	12.77	0.23	-0.07	103.45	169.14	9.44
V	%	80	21.36	21.15	14.04	5.54	0.91	3.18	6.57	44.31	25.93
Arcilla	%	80	17.03	16.76	12.33	2.52	0.33	-0.76	12.33	22.60	14.78
Limo	%	80	29.80	30.04	29.10	3.88	-0.09	-0.53	20.67	37.73	13.02
Arena	%	80	53.16	53.01	40.13	5.88	-0.11	-0.79	40.13	64.11	11.06

Tabla 3.9. Resultados estadísticos de las propiedades generales en el Horizonte A (N=número de muestras; Media, Mediana, Moda, σ =desviación típica; Asimetría, Curtosis, Min=Mínimo, Max=Máximo, C.V= coeficiente de variación).

El valor medio de la CE_{aV} es de 10.72 mS·m⁻¹ situándose en un intervalo de 6.72–14.67 mS·m⁻¹; el valor medio de la CE_{aH} es de 7.935 mS·m⁻¹ en un intervalo de 6.40 – 9.86 mS·m⁻¹. Estos valores podemos observar que el coeficiente de variación de de la CE_{aV} es medio, de 16.4%; mientras que el de la CE_{aH} es bajo con un valor de 9.39%. Podemos considerar los datos dentro de la normalidad, observando la asimetría, la curtosis, así como la distribución de frecuencias (Figura 3.8), se puede asumir la normalidad de los datos. Los valores son similares a los encontrados por SIQUEIRA (2009), en la misma zona de estudio; si bien ligeramente inferior a estos; esto puede ser debido a que la ser la fecha de muestreo (Septiembre 2011) fue posterior a los 3 meses más calurosos y más secos; la mayor evapotranspiración hace que el contenido de humedad en el suelo sea menor, influyendo en la medida de la conductividad eléctrica aparente del suelo.

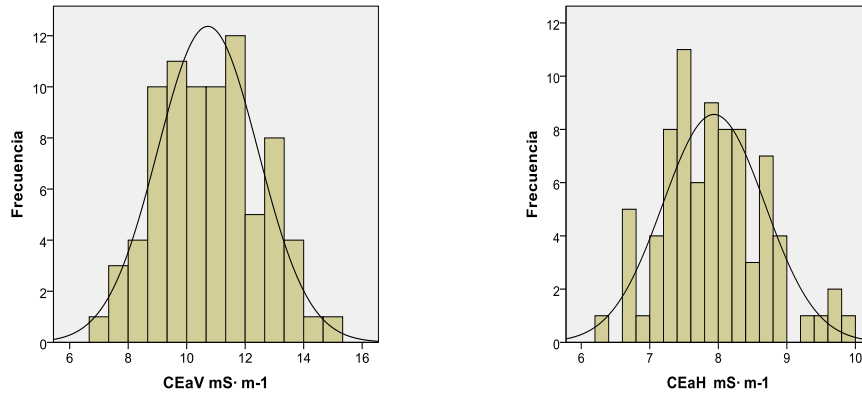


Figura 3.8.- Histogramas de la conductividad eléctrica aparente vertical y conductividad eléctrica aparente horizontal.

En cuanto a los coeficientes de variación en todo el Horizonte A; para el caso del pH el coeficiente de variación es bajo 3.89% (inferior al 5%); mientras que para la CIC, MO, H+Al, K, Ca, SB y V los coeficientes de variación son medios; y son altos para el caso del P, Al y Mg. La clasificación del coeficiente de variación de menor a mayor es: pH<CIC<MO<H+Al<SB<K<Ca<V<Al<Mg. Los C.V. del estudio granulométrico la clasificación queda de este modo arena<limo<arcilla, con C.V. todos ellos por debajo del 15%. Según los valores de asimetría y curtosis de los estos elementos, y atendiendo a la forma de los histogramas de distribución de frecuencias (Figura 3.9, Figura 3.10 y Figura 3.11) podemos asumir la normalidad de los datos de todas las propiedades estudiadas salvo en el caso del Mg.

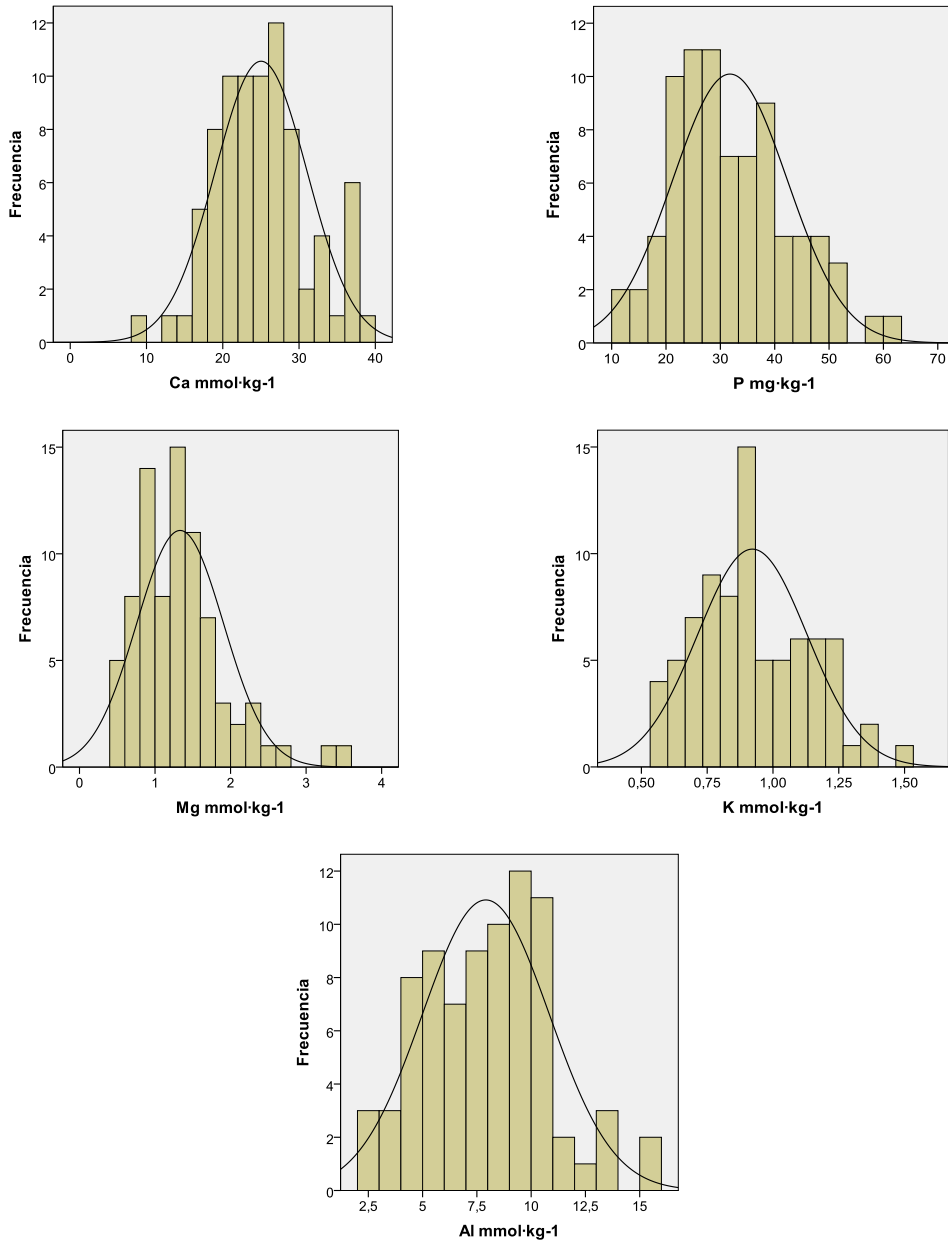


Figura 3.9.- Histogramas del Calcio, Fósforo, Magnesio, Potasio y Aluminio.

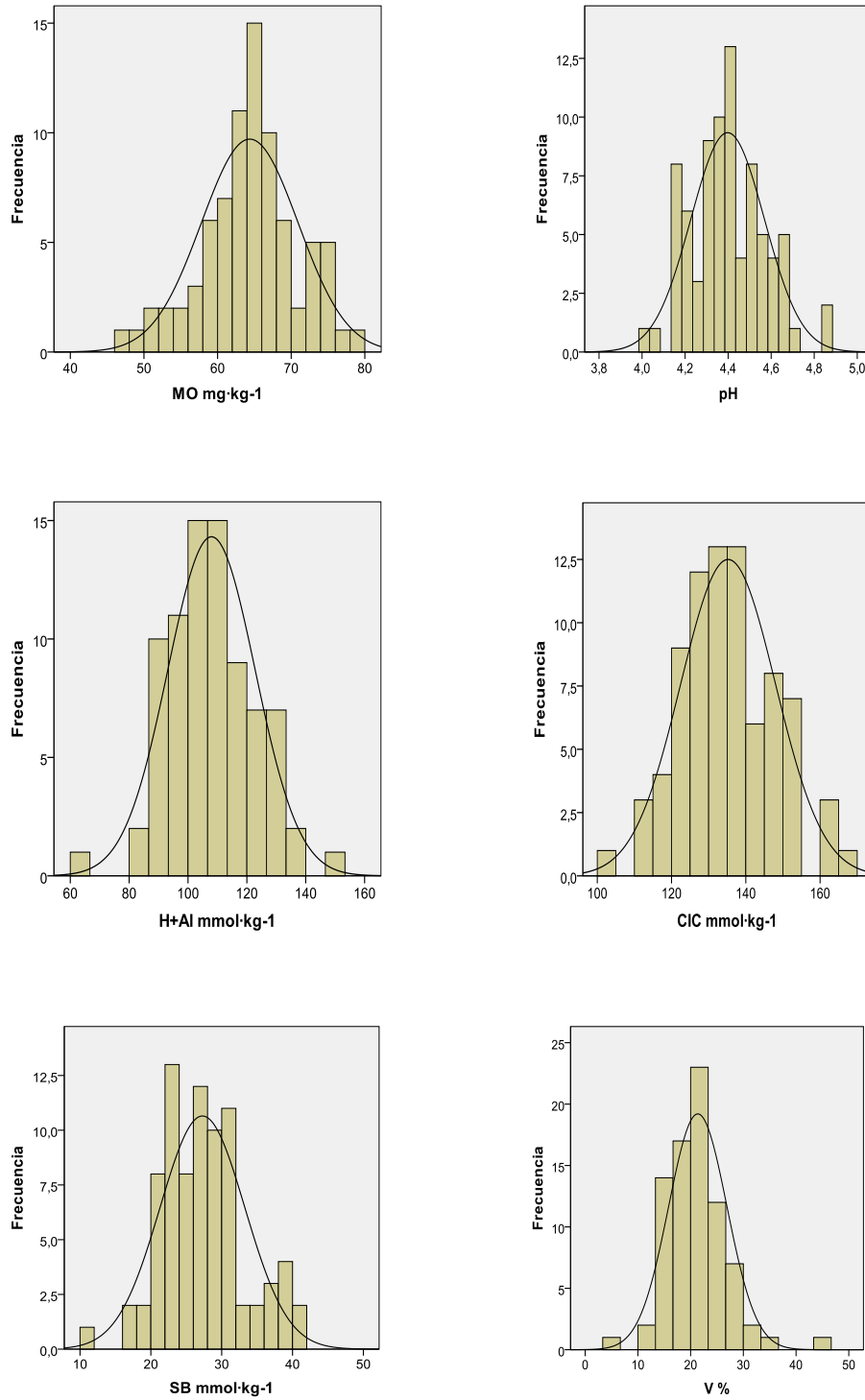


Figura 3.10.- Histogramas de la materia orgánica, pH, acidez de cambio, capacidad de intercambio catiónico, suma de bases y porcentaje de saturación de bases.

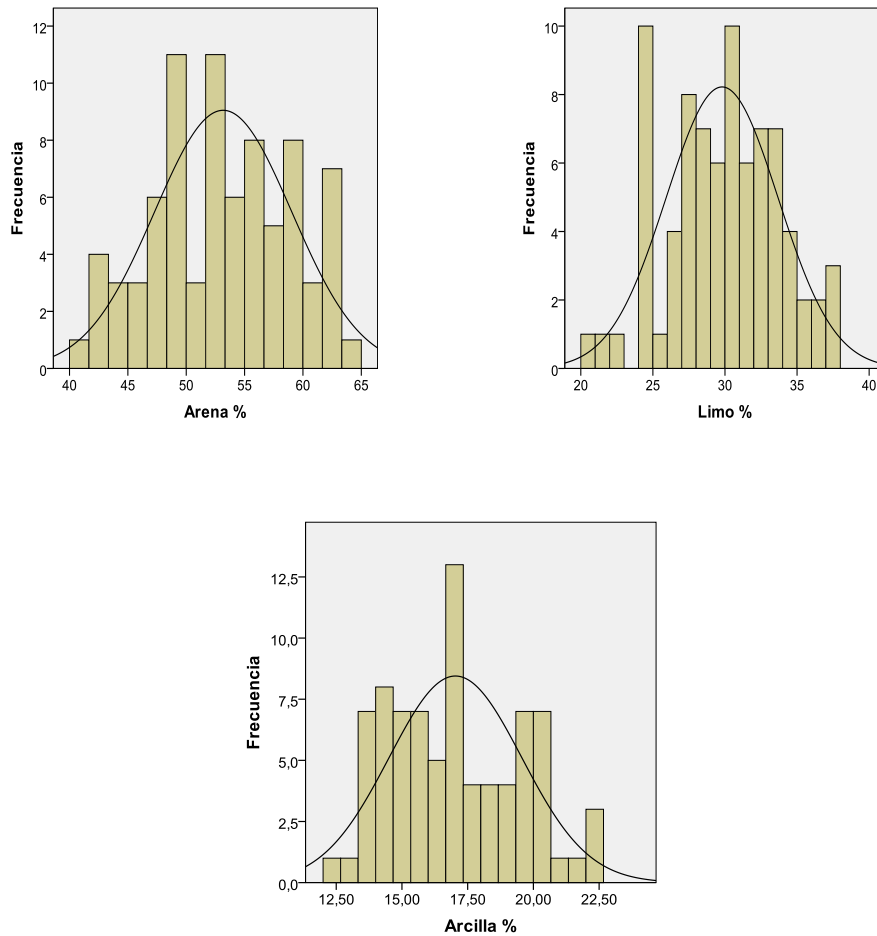


Figura 3.11.- Histogramas de la arena, la arcilla y el limo.

El contenido de las muestras tomadas, ponderando la profundidad de muestreo, para el pH tiene un valor medio de medio de 4.40. El valor medio de la MO presenta un valor medio de 64.37 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. El Ca presenta un valor medio de 25.03 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ con un intervalo de 8.46 – 38.0 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. El P, Mg y K en por su parte tienen unos valores medio de 31.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 1.33, y 0.92 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente. El Al tiene un contenido medio de 7.91 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. La acidez de cambio (H+Al), la suma de bases (SB), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el porcentaje de saturación de bases (V) poseen los siguientes valores medios respectivamente de 107.98 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 27.28 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 135.23 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ y 21%.

En la Tabla 3.10 se muestra la matriz de correlaciones entre las propiedades generales estudiadas.

Prop.	CE _v	CE _h	MO	pH	P	Ca	Mg	K	Al	H+Al	SB	CIC	V	Arcilla	Limo	Arena
CE _v	1	0.70**	-0.60**		0.30**	0.32**						0.33**	0.23*	0.48**	0.24*	-0.36**
CE _h		1	-0.45**											0.35**	0.22*	-0.30**
MO			1	0.23*				0.23*						-0.24*		
pH				1	-0.24*	0.64*			-0.80**	-0.65**	0.64**	-0.46**	0.70**			
P					1			0.38**								
Ca						1			-0.25*	-0.75**	-0.52**	0.99**	0.89**			
Mg							1							0.31**	0.40**	-0.40**
K								1								
Al									1	0.70**	-0.74**	0.46**	-0.78**		0.30**	-0.27**
H+Al										1	-0.52**	0.92**	-0.78**			
SB											1		0.89**			
CIC												1	-0.49**			
V													1			
Arcilla														1	0.67**	-0.87**
Limo															1	-0.95**
Arena																1

Tabla 3.10. Matriz de correlación de las propiedades generales (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

En este caso se han incluido en las correlaciones la conductividad eléctrica aparente del suelo medido en el dipolo vertical y en el horizontal. La conductividad eléctrica aparente vertical (CE_v) tiene correlaciones de alta significación positivas con la conductividad eléctrica aparente horizontal (CE_h), que podemos considerar moderada ($r=0.76$) y otra débil con el Ca, el P, la suma de bases (SB) y la arcilla ($r=0.32$, $r=0.30$, $r=0.33$ y $r=0.48$ respectivamente) y de sentido negativas con la MO y la arena ($r=-0.60$ y $r=-0.36$). Además la CE_v tiene una correlación altamente significativa y negativa con la materia orgánica, que se considera moderada ($r=-0.61$). La conductividad eléctrica aparente horizontal (CE_h) presenta una correlación negativa de alta significación con la MO y con la arena (con unos coeficientes, $r=-0.45$ y $r=-0.36$ respectivamente) y por último otra correlación positiva altamente significativa ($r=0.32$) con la arcilla. La MO por su parte no

presenta correlaciones de alta significación con ninguna de las restantes propiedades estudiadas. El pH presenta correlaciones altamente significativas con el Al, H+Al, SB, CIC y V (con unos coeficientes de correlación $r=-0.80$, $r=-0.65$, $r=0.64$, $r=-0.46$ y $r=0.70$ respectivamente). El Ca por su parte tiene correlaciones lineales altamente significativas con el Al, H+Al, SB, y V (con unos coeficientes de correlación $r=-0.75$, $r=-0.52$, $r=0.99$, $r=0.89$ respectivamente). El P se correlaciona con alta significación con el K en sentido positivo con un coeficiente de correlación $r=0.38$. El Mg se correlaciona de manera altamente significativa con las fracciones granulométricas; en sentido negativo con la arena ($r=-0.40$) en sentido positivo con el limo y la arcilla ($r=0.40$ y $r=0.31$ respectivamente). El Al por su parte presenta correlaciones altamente significativas con H+Al, SB, CIC y V (con unos coeficientes de correlación $r=0.70$, $r=-0.74$, $r=0.46$, $r=-0.78$ respectivamente) y además también con la granulometría, con el limo y la arcilla, siendo también alta la significación ($r=0.30$ y $r=-0.27$). La acidez de cambio presenta (H+Al) dos correlaciones positivas altamente significativas; con la capacidad de intercambio catiónico (CIC), siendo esta muy fuerte ($r=0.92$) y dos correlaciones negativas altamente significativas; con el porcentaje de saturación de bases (V) moderada ($r=-0.78$) y con la suma de bases (SB) moderada ($r=-0.52$). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) presenta una correlación negativa altamente significativa y moderada ($r=-0.49$) con el porcentaje de saturación de bases (V). La arcilla se relaciona de forma altamente significativa con el limo y la arena, con unos coeficientes de correlación $r=0.67$ y $r=-0.87$ respectivamente. El limo por su parte se relaciona de manera altamente significativa sentido negativo con la arena, con coeficiente de correlación muy alto $r=-0.97$.

Análisis de componentes principales

	CPG1	CPG2	CPG3	CPG4
Autovalores	5.015	3.089	1.461	1.102
Proporción Varianza	0.386	0.238	0.112	0.085
Varianza acumulada	0.386	0.623	0.736	0.821
Variables del CP				
MO	-0.023	-0.318**	-0.430**	0.667**
pH	0.832**	-0.047	-0.168	0.252*
Ca	0.861**	0.228*	0.362**	0.214
Mg	-0.037	0.508**	-0.288*	-0.131
K	-0.212	-0.058	-0.551**	0.438**
Al	-0.911**	0.144	-0.067	-0.022
H+Al	-0.844**	0.063	0.416**	0.291**
SB	0.854**	0.286*	0.296**	0.231*
CIC	-0.575**	0.206	0.632**	0.442**
V	0.942**	0.199	0.038	0.005
Arcilla	-0.016	0.883**	-0.036	0.024
Limo	-0.176	0.883**	-0.201	0.041
Arena	0.123	-0.961**	0.148	-0.038
Correlaciones CPsSuelo, altura, CEaV, CEaH y CPsTopografía				
Altura	0.233*	-	-0.337**	0.368**
CEaV	-	0.480**	0.298**	-0.251*
CEaH	-	0.339**	0.223*	-0.246*
CPT1	-	-	-0.276*	0.280*
CPT2	-	-	-	-

Tabla 3.11. Componentes Principales de las propiedades generales del Horizonte A

(* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

En la Tabla 3.11 se muestra el análisis de componentes principales realizado de las propiedades generales de la zona de estudio. Se observa que el 82% de la variabilidad de los datos (de las propiedades generales) quedan explicados mediante cuatro componentes principales (CPG) con autovalores superiores a 1.

El primer componente, **CPG₁**, explica el 38% de la variabilidad, en el cual, los elementos de peso destacable son el pH, el Ca, el Al, H+Al, SB, CIC y V. Al, H+Al, y CIC se asocian con signo negativo, con tendencia a decrecer cuando aumentan las asociadas a signo positivo (pH, Ca, SB y V). El **CPG₂** explica un 23% adicional de la variabilidad, siendo en este caso las fracciones granulométricas los principales elementos del componente (Mg y MO contribuyen en una menor medida). El tercer componente (**CPG₃**),

en el cual destacan principalmente la CIC, K, MO y H+Al; explica un 11% más de la variabilidad. En el último de los componentes, **CPG₄**, la MO la CIC y el Mg son los elementos con mayor contribución al componente, explica un 8.5% adicional de la variabilidad.

El CPG₁ no presenta correlaciones altamente significativas ni con la altura, CE_aV, CE_aH, ni con los componentes principales de la topografía (CPT₁ y CPT₂). El CPG₂ se correlaciona con alta significación con la CE_aV y la CE_aH en sentido positivo con unos coeficientes de correlación $r=0.48$ y $r=0.31$ respectivamente, algo que viene a corroborar las correlaciones lineales halladas entre ambas conductividades eléctricas y la arena (sentido negativo) y la arcilla (sentido positivo). Estas correlaciones han sido descritas por otros autores (WIENHOLD & DORAN, 2008; KORSAETH, 2008; KORSAETH, *et al.*, 2008) El CPG₃ presenta correlaciones altamente significativas con la altura ($r=-0.34$) y CE_aV ($r=0.30$). El CPG₄ tiene una correlación altamente significativa y de sentido positivo, con la altura ($r=0.386$).

3.5 CONCLUSIONES

1. El pH medio del Horizonte A determinado en la parcela es bajo, muy ácido (4.40), El contenido medio de materia orgánica (MO) es normal para suelos de pradera en Galicia ($64.37 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). La fracción granulométrica dominante en la parcela estudiada es la arena con un 53.16%, lo que da lugar a texturas francas y franco-arenosas. El Horizonte A es relativamente homogéneo, si bien la MO y el pH son menores en la profundidad $>20 \text{ cm}$; por otra parte la arcilla y el limo también disminuyen en profundidad.
2. En el Horizonte A, los coeficientes de variación de menor a mayor son: $\text{pH} < \text{CIC} < \text{MO} < \text{arena} < \text{limo} < \text{H+Al} < \text{arcilla} < \text{SB} < \text{K} < \text{Ca} < \text{V} < \text{P} < \text{Al} < \text{Mg}$. El coeficiente de variación del pH es bajo (3.89%) mientras que para la CIC, MO, arena, limo H+Al, arcilla K, Ca, SB y V los coeficientes de variación son medios. En las dos profundidades el pH presenta el menor coeficiente de variación; además los coeficientes de variación de MO, CIC, arena, limo y arcilla son inferiores al 20%.
3. En el Horizonte A, los coeficientes de asimetría son todos menores a 1 (salvo el Mg con 1.34) y los de curtosis inferiores a 3 (salvo el V con 3.18) con lo cual la mayor parte de las propiedades generales estudiadas se aproximan a la distribución normal. A la profundidad 0-20 cm las propiedades estudiadas se aproximan a la distribución normal mientras que a la profundidad $>20 \text{ cm}$, no se cumple para Mg, K y V.

4. En los 80 puntos la CE_aV muestra un intervalo de $6.72 - 14.67 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ siendo la media de $10.72 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$; la CE_aH tiene un intervalo de $6.40 - 9.89 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ y una media de $7.93 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$. El coeficiente de variación de la CE_aV es de 16.4%, medio; mientras que el de la CE_aH es bajo con un valor de 9.39%. Atendiendo a los datos de asimetría y curtosis, se considera que los datos tanto de la CE_aV como de la CE_aH se aproximan a la normalidad.
5. Las correlaciones lineales más destacadas entre la CE_aV y la CE_aH y las propiedades generales del Horizonte A aparecen con la MO (sentido negativo) y con la arcilla (sentido positivo). MO y arcilla por su presentan una débil correlación negativa. Además, el Ca se correlaciona con alta significación (negativamente) con el pH y Al. El Mg por su parte se correlaciona con alta significación con las 3 fracciones granulométricas.
6. El estudio de los componentes principales del Horizonte A nos muestra que en el componente CPG_1 , que explica el 38% de la variabilidad de los datos, viene determinado por las propiedades del complejo de cambio y el pH; que no se encuentran asociadas ni a la MO ni a las fracciones granulométricas. El CPG_2 donde las fracciones granulométricas son las propiedades más importantes, confirma la asociación negativa entre arcilla y MO. El CPG_3 , tienen mayor peso algunas variables del complejo de cambio, y pone de manifiesto la asociación negativa entre CIC y MO. El CP_4 que tiene a la MO como propiedad dominante muestra, esta se asocia positivamente a K y CIC.

7. Los componentes principales de las propiedades generales (del Horizonte A) obtenidos se correlacionaron con variables topográficas y con la conductividad eléctrica de la siguiente manera: El CPG_1 presentó una débil correlación positiva con la altura, el CPG_2 muestra correlación altamente significativa (positiva) con la CE_aV y CE_aH , pero no con la altura.

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS ELEMENTOS EXTRAÍDOS

4.1 INTRODUCCIÓN

El 95% de la materia seca de los vegetales está compuesto por carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno. El 5% restante lo forman diversos elementos minerales, de los que unos son imprescindibles para el desarrollo vegetal y otros accesorios. La mayor parte del oxígeno y el carbono lo obtienen directamente del aire, por fotosíntesis, mientras que el hidrógeno deriva directa o indirectamente del agua del suelo.

Sin embargo a las plantas no pueden sobrevivir únicamente con aire y agua, sino que necesitan cierto número de elementos químicos que obtienen de las sustancias minerales del suelo a través de su sistema radicular. Estos elementos, que constituyen una pequeña parte del peso de la planta, son esenciales para la nutrición de la misma. Estos elementos son generalmente los que limitan el desarrollo de los cultivos. El crecimiento de las plantas, salvo en casos extremos como sequía, enfermedades, temperatura, no se ve alterado en demasía por una falta de carbono, oxígeno o hidrógeno. Ahí radica la importancia de los nutrientes del suelo y de los elementos que contienen.

Se admite que para que un elemento sea considerado esencial para las plantas debe cumplir una serie de criterios:

- a) La ausencia del elemento no permite completar etapas vegetativas o reproductivas del ciclo vital de las plantas.
- b) La deficiencia ha de ser específica, y únicamente puede ser corregida mediante el suministro del elemento en cuestión y no puede ser sustituido por otro elemento.

- c) El elemento debe estar directamente implicado en la nutrición de la planta, con independencia de sus posibles efectos en la corrección de condiciones desfavorables, químicas o microbiológicas del medio externo.

Actualmente se consideran a 16 elementos como esenciales para el crecimiento de las plantas, y cuatro más son esenciales solo para algunas de ellas. En la Tabla 4.1 están clasificados según sus fuentes, su total o parcial esencialidad y la magnitud de su utilización por la planta.

NUTRIENTES ESENCIALES PARA LAS PLANTAS			
Esenciales para todas las plantas		Esenciales para algunas las plantas	
Cantidades relativamente grandes		Cantidades relativamente pequeñas	Cantidades relativamente pequeñas
<i>Extraídos del aire en forma de CO₂ o del agua del suelo</i>	<i>Extraídos de los sólidos del suelo</i>	<i>Extraídos de los sólidos del suelo</i>	<i>Extraídos de los sólidos del suelo</i>
1 Carbono 2 Hidrógeno 3 Oxígeno	4 Nitrógeno 5 Fósforo 6 Potasio 7 Calcio 8 Magnesio 9 Azufre	10 Hierro 11 Manganeseo 12 Boro 13 Molibdeno 14 Cobre 15 Zinc 16 Cloro	17 Sodio 18 Silicio 19 Cobalto 20 Vanadio

Tabla 4.1. Elementos químicos esenciales para las plantas (NAVARRO BLAYA & NAVARRO GARCÍA, 2003).

De los elementos esenciales para todas las plantas y obtenidos del suelo, seis de los trece se requieren en cantidades relativamente grandes: N, P, K, Ca, Mg y S. Se designan habitualmente con el nombre de *macronutrientes* o *elementos primarios*. Si estos escaseasen en el suelo, el crecimiento de la planta se reduciría notablemente. El resto de elementos: Fe, Mn, B, Mo, Cu, Zn y Cl se utilizan en cantidades pequeñas por las plantas, y son denominados, *elementos traza* u *oligoelementos* más comúnmente.

4.2 PROPIEDADES ESTUDIADAS

4.2.1 Macronutrientes

Los nutrientes que la planta toma del suelo son elementos esenciales necesarios para el crecimiento de la misma. Las plantas absorben, por lo menos, noventa elementos diferentes, pero utilizan seis de ellos en grandes cantidades, considerados como *macronutrientes*; entre estos se encuentran el P, K, Ca y Mg. La mayoría de suelos, aunque no todos, suministran cantidades suficientes de calcio y magnesio, los edafólogos los consideran macronutrientes secundarios, en tanto que los primarios (fósforo y potasio), también denominados elementos fertilizantes, no están normalmente disponibles en cantidades suficientes para proporcionar un adecuado crecimiento a las plantas, por ello deben ser añadidos al suelo mediante fertilización (SCHACHTSCHABEL *et al*, 1992; PLASTER, 2000). El Nitrógeno no es objeto de estudio en este trabajo, y su cantidad en los suelos tiene una variación muy grande. Es el macronutriente más adicionado como fertilizante, dado que las plantas lo requieren en grandes cantidades, y en las rocas ígneas solo existen trazas de él. Cerca al 78% del aire es nitrógeno, pero esta forma gaseosa no es accesible para las plantas superiores; para que pueda ser utilizado debe combinarse con oxígeno o hidrógeno. Un 99% del nitrógeno del suelo se encuentra en estructuras proteicas y en otros compuestos orgánicos. Los iones NH_4^+ , cuando existen, pueden ser retenidos en los sitios del intercambio catiónico, pero, en general, se convierten rápidamente en iones NO_3^- gracias a la acción de las bacterias nitrificantes (THOMPSON & THROEH, 1982).

4.2.1.1 Fósforo

Hay que destacar que en el suelo no existe P libre, se encuentra combinado en forma de fosfatos de diferente naturaleza y estado. Los fosfatos en el suelo se encuentran formando parte de diferentes combinaciones (minerales y orgánicas) e ionizados en formas aniónicas, ya sean libres en las soluciones del suelo o fijados a diferentes partículas capaces de retenerlos.

Los fosfatos minerales más abundantes son sales del ácido ortofosfórico con calcio, que forman yacimientos de origen sedimentario impurificados con cloro, flúor, carbonatos, grupos OH⁻, etc. La fosforita es fosfato tricálcico, pero aparece impurificada con los aniones anteriormente citados dando lugar a cloroapatito, fluorapatito, hidroxiapatito y carbonatoapatito. Otros minerales menos importantes son los formados por combinaciones de ácido fosfórico con hierro y aluminio, como por ejemplo la variscita y la estrengita.

Los fosfatos orgánicos se encuentran formando parte de las materias integrantes de la materia orgánica o combinados con los ácidos húmicos del suelo (humofosfatos). Los compuestos de P más abundantes son fitina, lecitina, cefalina, ácidos fosfatídico, ácidos nucleicos, etc.

Las formas iónicas se encuentran fijadas por diversas partículas del suelo capaces de retenerlas o libres en la solución del suelo. El conjunto de ambos grupos de iones es lo que suele designarse con los nombres de “pool” de iones autodifusibles e “iones isotópicamente cambiables”. Los iones fijados se encuentran fundamentalmente:

- Sobre el complejo arcillo-húmico mediante puentes de calcio. Esta fijación será más fuerte cuanto mayor sea el pH.

- Sobre los bordes o grietas de la red cristalina de arcillas. Es una fijación estable y corresponde a una desorción lenta.
- Adsorbido sobre partículas muy fina de caliza.
- Fijados por coloides electropositivos. En suelos ácidos es la única forma de fijación de fósforo en forma mineral.

Los iones libres se encuentran en la solución del suelo; pudiendo aparecer distintos grados de ionización dependiendo la mayor o menor abundancia de unos u otros de la reacción del suelo. En los suelos ácidos existe un predominio de los iones monovalentes, mientras que en los neutros la proporción suele ser del orden del 50% entre mono y divalentes. A medida que se eleva el pH van desapareciendo las formas divalentes, dejando paso a las trivalentes. A niveles de pH próximos a 12 existiría un equilibrio del 50% entre di y trivalentes. Niveles de basicidad superiores a 12 supondrían la presencia casi exclusiva de formas trivalentes.

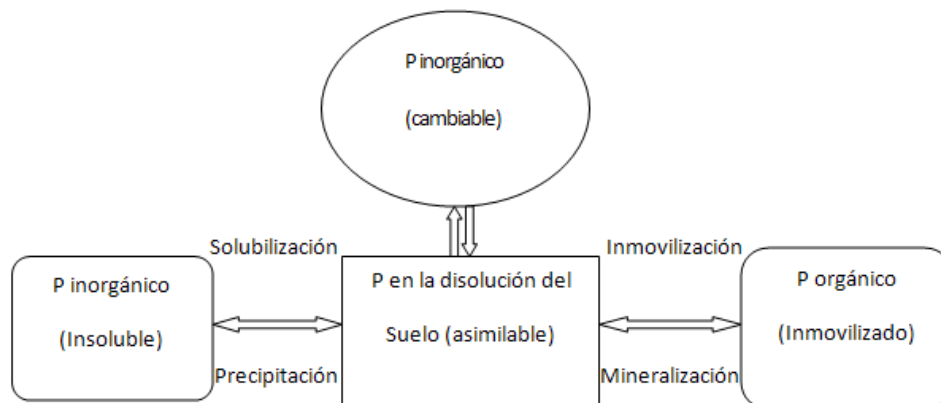


Figura 4.1. Equilibrio del P en el suelo (URBANO TERRÓN, 1989)

4.2.1.2 *Calcio*

El Ca en el suelo aparece en formas combinadas y libres. Se encuentra combinado en compuestos minerales y orgánicos. Los compuestos minerales más importantes son los siguientes:

- Silicatos y aluminosilicatos: Anortita, oligoclasa, andesina y labradorita, piroxenos y anfíboles, y hornblenda.
- Fosfatos: Apatito y fosforita.
- Carbonatos: Calcita y dolomita
- Sulfatos: Yeso y anhidrita.

El Ca orgánico se encuentra formando parte de la materia orgánica del suelo o combinado con los ácidos húmicos y fosfórico en los humatos y fosfohumatos de cal.

La solución del suelo podría empobrecerse por:

- Lixiviación: aguas de lluvia o riego arrastrarían en profundidad el Ca^{2+} .
- Absorción por las plantas cultivadas y por la vegetación adventicia.
- Utilización por los microorganismos del suelo.
- Precipitación por los aniones CO_3^{2-} , HCO_3^- y SO_4^{2-} . En climas áridos suelen aparecer en forma de costras y de yeso.

La solución del suelo puede enriquecerse por:

- Aportes de cal en forma de enmiendas.
- Aporte de fertilizantes que contengan cal.

- Alteración con solubilización de los compuestos minerales del suelo que contengan cal.
- Mineralización de la materia orgánica y descomposición de los humatos y humofosfatos de cal.

Los efectos del Ca activo (Ca^{2+}) sobre el suelo son múltiples y afectan a un buen número de propiedades.

Sobre la física del suelo:

- Actúa como *floculador* de los coloides electronegativos, de donde resulta que la arcilla y el humus precipitarán dando lugar a un complejo arcillo-húmico con Ca adsorbido.
- Favorece la *estabilidad estructural* del suelo al mantener floculado el complejo arcillo-húmico.
- Favorece los *mecanismos de difusión gaseosa* entre la atmósfera del suelo y la atmósfera exterior.
- Permite la circulación del agua en el suelo al impedir la destrucción de agregados y el taponamiento de los poros del suelo.

Sobre la química del suelo:

- Neutraliza la *acidez actual* de las soluciones del suelo elevando su pH.
- Contribuye a aumentar el porcentaje de saturación de bases (V) del complejo adsorbente, reduciendo la *acidez de cambio* del suelo.

- Interviene en los mecanismos de intercambio catiónico entre la solución y el complejo, con el consiguiente efecto sobre la fertilidad del suelo y sobre la nutrición de los vegetales.
- Forma, con los ácidos húmicos y fosfórico, fosfohumatos de cal que permiten la inmovilización en forma lábil del ácido fosfórico, impidiendo su retrogradación.
- Eleva el potencial redox del suelo.
- Es antagonista de algunos elementos minerales (K, Fe, Mn, B, Zn) dificultando su asimilación y reduciendo su fitotoxicidad (Mn, B, Zn)

Sobre la biología del suelo:

- Es alimento de vegetales y microorganismos del suelo.
- Favorece la respiración radicular.
- Favorece la evolución de la materia orgánica del suelo, los mecanismos de humificación y mineralización se ven favorecidos por el Ca^{2+} .
- Estimula la acción de los microorganismos nitrificadores.
- Estimula la acción de los microorganismos simbióticos y no simbióticos fijadores de nitrógeno atmosférico.
- Reduce la virulencia de algunas enfermedades típicas de suelos ácidos.

4.1.2 Micronutrientes

Podemos denominar como micronutrientes aquellos cuya concentración total en el suelo es normalmente menor de $1000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, son llamados elementos traza. Dentro de este grupo podemos incluir a los micronutrientes (Cu, Mn y Zn), imprescindibles para plantas y animales en pequeña concentración, pero que pudieran ser tóxicos a ciertos niveles. La excepción dentro de ellos es el Fe, que es un micronutriente pero no estrictamente un elemento traza (WHITE, 2000). También pueden ser denominados

elementos minoritarios, indicando con ello que su contenido en los tejidos de las plantas es menor en relación a los macronutrientes (MORTVEDT, 2000).

El contenido total de micronutrientes en el suelo es función del material de partida y de procesos edafológicos. El rango de concentración de estos elementos en el material geológico es amplio, y siempre dentro de un tipo de roca dado, la composición es bastante variable. La distribución de los microelementos no es completamente independiente ya que algunos de los elementos están relacionados en el material de partida y esta relación puede persistir en el suelo.

4.2.2.1 Hierro

El Fe en el suelo puede formar parte de combinaciones orgánicas, pero la más importante son las formaciones minerales. En éstas a su vez se encuentra formando parte de compuestos más o menos estables, en formas ionizadas de Fe elemental (Fe^{2+} , Fe^{3+}) o como hidróxidos ($\text{Fe}(\text{OH})^+$, $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$). Las formas ionizadas se presentan fijadas sobre el complejo adsorbente o libres en la solución del suelo. Los compuestos minerales tienen origen magmático (silicatos y carbonatos), sedimentario (sulfuros) o metamórfico (óxidos e hidróxidos). Su alteración, muy lenta para los magmáticos, aumentando en velocidad para los sedimentarios y metamórficos:

- Silicatos y aluminosilicatos de Ca, Mg, Fe, etc.: Piroxenos, anfíboles, biotita, etc.
- Carbonatos: Siderita
- Sulfuros: Pirita y calcopirita
- Óxidos e hidróxidos: Oligisto, limonita, magnetita.

La degradación de estos minerales origina en los suelos no reductores, la aparición de hidróxidos trivalentes $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Estos hidróxidos, de naturaleza coloidal, pueden unirse a las arcillas y ácidos orgánicos formando complejos o transformarse en óxidos por deshidratación. Las arcillas se recubren de una fina capa de Fe_2O_3 flocculado, de color rojo. En ausencia de aire (compactación o hidromorfismo), el Fe se presenta en formas reducidas $\text{Fe}(\text{OH})_2$ y FeO que originan coloraciones pardas o verde-grisáceas (BAEYENS, 1970).

En forma elemental, aparecen los Fe^{2+} y Fe^{3+} en las soluciones del suelo y sobre el complejo adsorbente. La presencia de una u otra forma depende de la solubilidad de los diferentes compuestos de Fe, que, a su vez es función de la reacción del suelo. Los compuestos ferrosos son solubles por debajo de pH 6, mientras que los férricos se solubilizan solamente a pH inferior a 4. Además hay que tener en cuenta que en el suelo existe un equilibrio entre las dos formas (Fe^{2+} , $\text{Fe}^{3+} + e^-$) función de las condiciones oxidantes o reductoras del suelo (potencial redox). Este potencial depende de las condiciones fisicoquímicas y biológicas. Por vía fisicoquímica, las condiciones reductoras de determinados suelos (acidez, apelmazamiento, bajas temperaturas, encharcamiento, etc.) hace que predominen los Fe^{2+} . Las condiciones oxidantes de los suelos (mullimiento, elevado pH, alto contenido en Ca^{2+} , drenaje, etc.) favorecen la presencia de Fe^{3+} . En cualquier caso, parece ser que la actividad biológica de algunas bacterias es más importante que las condiciones fisicoquímicas en el equilibrio entre ambas formas de Fe:

- La oxidación del Fe^{2+} por *Thiobacillus ferrooxidans* y *Ferrobacillus ferrooxidans*, en aerobiosis, origina la precipitación de importantes cantidades de Fe en forma $\text{Fe}(\text{OH})_3$, ya que el rendimiento energético de la reacción es muy bajo.
- En anaerobiosis, *Sporovibrio ferrooxidans* puede oxidar Fe^{2+} a Fe^{3+} , siempre que existan NO_3^- como aceptores de electrones.

- Numerosas bacterias, *Bacillus polymyxa*, *B. circulans*, *Aerobacter aerógenes*, etc., pueden reducir el Fe^{3+} , en anaerobiosis (suelos saturados de agua o zonas de la rizosfera muy ricas en CO_2) (TAKAI & KAMURA, 1966).

El Fe orgánico aparece en el suelo en proporciones mucho menores que el Fe mineral. Se combina con los ácidos húmicos, fúlvicos, cítrico, salicílico, etc., que se originan en el suelo al descomponerse la materia orgánica. Estas combinaciones son de tipo quelatos y tienen la particularidad, a diferencia de las combinaciones minerales, de ser más solubles en medio neutro que en medio ácido. Existen algunos quelatos de naturaleza bastante simple en los que la parte orgánica está formada por un radical alifático junto a otros quelatos mucho más complejos, con radicales cíclicos, en los que interviene la lignina. El Fe se encuentra estabilizado en el interior de los quelatos, libre de las oxidaciones y reducciones que tanto afectan al Fe mineral. Sin embargo, puede ser desplazado por Cu y Zn, que, a su vez se quelatan también. Los quelatos son bastante solubles y pueden desplazarse con los movimientos del agua del suelo.

4.2.2.2 *Manganeso*

El Mn del suelo procede de minerales primarios de origen magmático. Minerales como la biotita, augita, hornblenda, moscovita, etc., son silicatos que contienen entre 1 % y 0.3% de Mn. La meteorización de estos silicatos da lugar a diferentes óxidos (MnO_2 , MnO_4 y Mn_2O_3), de naturaleza insoluble, en los que el Mn aparece con números de oxidación +4 y +3. Los óxidos Mn_3O_4 se interpretan como $\text{MnO}_2 \cdot 2\text{MnO}$. Los óxidos de menor grado de oxidación (MnO) son solubles en medio ácido y dan lugar a $\text{Mn}^{2+} + 2\text{OH}^-$. El Mn libre (Mn^{2+}) pasa a las soluciones del suelo y se fija sobre el complejo adsorbente.

La proporción entre la forma iónica (Mn^{2+}) y las combinaciones MnO_2 y Mn_2O_3 en el suelo, depende de su potencial redox, pH y actividad microbiana. Según DOMMERGUES & MANGENOT (1970), en los pH extremos domina la acción

fisicoquímica, mientras que en los intermedios son los procesos microbianos los que regulan la oxidación y reducción del Mn:

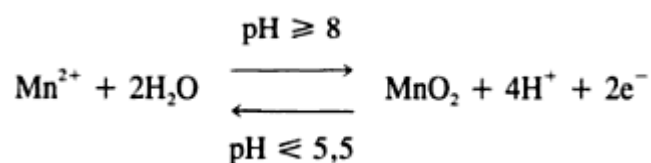


Figura 4.2. *Equilibrio del Mn en el suelo (URBANO TERRON, 1989).*

Según la Figura 4.2, para $\text{pH} \leq 5.5$ hay dominio de formas libres de Mn reducido, y para los $\text{pH} \geq 8$ son los óxidos de Mn, insolubles, los que dominan. Diversos microorganismos del suelo pueden oxidar en condiciones ecológicas adecuadas, (pH, aireación, temperatura, humedad, etc.) el Mn reducido. Destacan:

- Bacterias: *Aerobacter spp*, *Pseudomonas spp*, *Corynebacterium spp*; etc.
- Hongos: *Helminthosporium spp*, *Cladosporium spp*; etc.
- Actinomicetos: *Nocardia spp*, *Streptomyces spp*; etc.

Asimismo, en condiciones reductoras del suelo, otros microorganismos, como son las bacterias del género *Thiobacillus*, reducen las formas Mn^{4+} y Mn^{3+} . Además las formas minerales, libres y combinadas, existe en el suelo Mn que forma parte de complejos orgánicos con los ácidos húmicos y otras sustancias de origen vegetal y microbiano (fenoles y ácidos alifáticos). Son quelatos de naturaleza similar a los de Fe, pero con la particularidad de que el Mn tiende a formar quelatos con mucha mayor facilidad que el Fe.

4.2.2.3 *Cinc*

Aparece combinado en formaciones minerales:

- *Blenda* (sulfuro de cinc).

- *Esmiltsonita* (carbonato de cinc).

- *Hemimorfita* (silicato de cinc).

La meteorización de estos minerales liberará Zn^{2+} , que a su vez, pueden formar nuevas formas minerales u orgánicas, fijarse al complejo adsorbente o quedar libre en las soluciones del suelo.

Reacciona con los CO_3^{2-} , PO_4^{3-} y OH^- , formando carbonatos, fosfatos e hidróxidos muy insolubles. En los suelos agrícolas la aplicación de fertilizantes fosfatados y la realización de enmiendas calizas disminuyen la disponibilidad de cinc asimilable.

Con la materia orgánica del suelo forma complejos órgano-metálicos de naturaleza quelante. El complejo arcillo-húmico fija en superficie pequeñas cantidades de Zn^{2+} cambiante. Normalmente, éstas representan menos del 1% de la capacidad de intercambio catiónico del complejo.

En las soluciones del suelo se encuentran pocos Zn^{2+} debido a la fijación por el complejo adsorbente y a su precipitación por carbonatos y fosfatos. Esto explica que sea un elemento poco lixiviado y que se acumule en los horizontes superficiales del suelo.

4.2.2.4 **Cobre**

El cobre en el suelo aparece combinado en compuestos minerales tales como:

- *Calcopirita*: Sulfuro de cobre e hierro.

- *Calcosita*: Sulfuro de cobre.

- *Malaquita y azurita*: Carbonatos de cobre.

- *Cupirita*: Óxido de cobre.

La meteorización de estos minerales liberará el Cu^{2+} , que, a su vez, podrá fijarse por algunas partículas o pasar a las soluciones del suelo.

Los Cu^{2+} son fijados por el complejo arcillo-húmico y por las arcillas del suelo. Investigaciones realizadas con mezclas de materiales arcillosos y orgánicos, han demostrado que la fijación se inicia en los orgánicos y continúa en los arcillosos. Se ha comprobado, asimismo, que la combinación arcilla-cobre se hidroliza fácilmente, con lo que se libera Cu^{2+} con una mayor rapidez.

En suelos con mucha materia orgánica y, especialmente con elevado contenido de humus bruto, hay fuerte inmovilización de Cu en forma de quelatos.

En la solución del suelo hay poco Cu: generalmente, menos del 1% del contenido total. A su vez, este Cu^{2+} , presenta escasa movilidad, por lo que las pérdidas por lavado son pequeñas, incluso en climas lluviosos o con cultivos de regadío.

4.2.3 Metales Pesados

Además de los macro y micronutrientes en el perfil, están presentes otros elementos, de modo que la variedad y la cantidad de éstos en un suelo son prácticamente inabarcables, destacando los metales pesados. Bajo la denominación de metal pesado se incluyen una serie de metales, generalmente de transición, cuya principal característica es poseer una densidad superior a $6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (ALLOWAY, 1995; MATOS *et al.*, 1996).

Dentro de ellos algunos son esenciales para la vida animal y vegetal, como los micronutrientes anteriormente descritos, pero otros sin embargo no se consideran esenciales, o incluso se consideran potencialmente tóxicos como el Cd, Cr, Ni y Pb.

La mayoría aparecen en el suelo en concentraciones muy baja, cantidades traza, relacionados geoquímicamente con el material de partida (LEE *et al.*, 1997) y también con las posibles deposiciones atmosféricas. Sin embargo, a lo largo del siglo XX sus niveles se

han incrementado debido a la acción humana (WHITE, 2000). Generalmente la distribución y contenido dentro del suelo está influenciado por varios factores: material origen, contenido de materia orgánica, mineralogía, edad del suelo, drenaje, vegetación, entre otros (LEE *et al.*, 1997).

4.2.3.1 Cadmio

Se considera un elemento tóxico para todos los organismos, incluso en pequeñas concentraciones, aunque sus niveles naturales en el ambiente no suelen causar toxicidad.

El nivel promedio de cadmio en suelos se sitúa entre 0.07 y 1.1 mg·kg⁻¹, con un nivel base natural que no excedería de 0.5 mg·kg⁻¹ (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 1984). Algunos suelos pueden tener niveles de Cd más elevados debido a que las rocas de las que se formaron tenían este elemento en su composición.

Una de las vías de incorporación de Cd a suelos agrícolas es la fertilización fosfatada. Las rocas fosfóricas, que son la materia prima de los fertilizantes fosfáticos, contienen niveles de metales pesados que varían según su origen geográfico, pero generalmente mayores a los de la corteza terrestre. Los metales permanecen en una proporción importante en los fertilizantes industriales y posteriormente son aplicados al suelo junto con el fósforo (CHARTER *et al.*, 1993; MERMUT *et al.*, 1996; GABE & RODELLA, 1999).

A partir de las aguas residuales urbanas se obtienen lodos que por su contenido de nutrientes son utilizados en la fertilización de algunos cultivos y que debido a sus altos niveles de materia orgánica pueden ser útiles en recuperación de suelos en proceso de desertificación (SUMMER, 2000). Cuando estos lodos provienen de aguas que hayan recibido efluentes industriales, su aplicación continua en suelos agrícolas puede producir la acumulación de estos elementos en el suelo (TAYLOR *et al.*, 1995; KREBS *et al.*, 1998;

KAWASAKI *et al.*, 2000). Entre los metales pesados que pueden estar presentes en estos lodos, el Cd es el que genera más riesgos ambientales por su movilidad en el suelo y la facilidad con la que las plantas lo absorben.

Otras fuentes menos importantes de contaminación por Cd, son los aportes aéreos, en forma de polvo y vapores, provenientes de explotaciones mineras, de fundiciones de metales y de plantas incineradoras.

El Cd de origen antropogénico, generalmente se presenta en horizontes superficiales, y será más disponible que el proveniente de la meteorización de las rocas; si bien su absorción por las plantas dependerá de factores de suelo y de cultivo. Aquellos factores y condiciones del suelo que favorezcan la movilidad del elemento también facilitarán la absorción por las plantas, mientras que los que contribuyan a su retención por la matriz del suelo disminuirán la disponibilidad del elemento. En general, puede decirse que cuanto mayor sea el pH del suelo, mayor será la retención de Cd. Hay varias razones para ello, entre otras la formación de complejos con menor densidad de carga negativa por la unión del ión metálico con los iones OH^- y el incremento de las cargas positivas en las superficies de óxidos o de otros materiales de carga variable donde el ión metálico puede adsorberse (PARDO, 1997; WU *et al.*, 2000). La presencia de carbonatos puede también contribuir a la retención de Cd en formas poco disponibles para las plantas (HOODA & ALLOWAY, 1998; GARCIA *et al.*, 2000).

La mineralogía también puede resultar determinante en la disponibilidad de Cd para las plantas. Los suelos con una elevada capacidad de intercambio catiónico bien sea por su material original o por su proceso edafogénico, tendrán también una mayor capacidad para retener el Cd. La cantidad de Cd inicial de un suelo sigue el orden de la evolución de estos, de forma que los suelos más evolucionados tienen valores más bajos, de pH ácido, bajos valores de CIC y textura gruesa (HOLMGREN *et al.*, 1993; MA *et al.*, 1997).

La materia orgánica puede tener efectos opuestos en la disponibilidad del Cd. La fracción soluble puede acomplejar el Cd, facilitar su movilidad en el suelo y al mineralizarse dejar el mineral en una forma más disponible para las plantas. La fracción orgánica más estabilizada, más resistente por tanto a la mineralización, puede retener los metales pesados en forma no disponible para las plantas.

4.2.3.2 Cromo

Se admite que el Cr no es esencial para la planta, aunque está demostrado que si lo es para animales y el hombre (ALLOWAY, 1995).

En la mayor parte de los suelos el contenido de Cr oscila entre 5-100 mg·kg⁻¹ y en aquellos desarrollados sobre rocas ricas en este elemento, se ha determinado hasta 3000 mg·kg⁻¹. TABOADA CASTRO (2002) llegó a aportar valores de 6360 mg·kg⁻¹ de Cr en suelos desarrollados sobre rocas de origen ultramáfico (peridotitas). Mediante la precipitación se puede aportar al suelo de 2-47 g·ha⁻¹, y dado que este elemento es muy poco móvil, la deposición atmosférica determina un enriquecimiento de Cr en los primeros centímetros del suelo. En condiciones naturales, la mayor parte de este elemento en las rocas de la corteza y en los suelos se encuentra como crómico, Cr³⁺; más estable y también como cromato, Cr⁶⁺. Generalmente la mayor parte del Cr³⁺ es un constituyente de la red del óxido denominado cromita (FeCr₂O₄), siendo un mineral muy resistente a la meteorización y normalmente asociado con rocas máficas y ultramáficas. El Cr³⁺ puede reemplazar al Fe³⁺ y Al³⁺ en muchos minerales. El estado de oxidación-reducción y valores de pH intervienen en las formas de Cr que se hallan en el suelo, sin embargo su contenido es inherente al material origen y por ello se aprecian concentraciones elevadas de Cr en suelos derivados de rocas máficas y volcánicas (ALLOWAY, 1995; KABATA-PENDIAS, 2001).

Como con todos los metales pesados, la solubilidad del Cr se ve afectada por cambios de pH, por el potencial redox y por la composición del suelo en cuestión. En suelos con materia orgánica, que tiene un papel de donadora de electrones, se estimula la transformación de Cr^{6+} (inestable y móvil) a Cr^{3+} (estable en el suelo al ser adsorbido fuertemente por las partículas del mismo, precipitando casi completamente a pH 5.5), a pesar de que el Cr asociado a la materia orgánica es una pequeña parte del total. Es importante esta conversión de Cr^{6+} soluble a Cr^{3+} insoluble, dado que el Cr^{6+} es tóxico para plantas y animales. Esta reducción Cr^{6+} a Cr^{3+} , es más rápida en suelos ácidos que en alcalinos. Así en la mayoría de los suelos predomina la forma insoluble y menos móvil de Cr^{3+} , asociada a óxidos e hidróxidos. La oxidación de una parte del Cr^{3+} sucede a valores de pH superiores a 5 (ALLOWAY, 1995). Se ha demostrado que la adsorción de arcillas es también dependiente del pH, y que mientras la adsorción del Cr^{3+} , se eleva al aumentar el pH, la del Cr^{6+} decrece con el incremento del mismo. El nivel de Cr en la solución del suelo es bajo, y únicamente resulta elevado en aquellos de reacción muy ácida. El contenido de Cr de la solución del suelo en condiciones neutras y ácidas oscila entre $60\text{-}40\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, pero para valores de pH inferiores a 4, se han determinado concentraciones de $400\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Experiencias con soluciones nutritivas muestran que la toxicidad en plantas puede comenzar a partir de niveles menores de $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para el Cr^{6+} y del orden de $1\text{-}5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para el Cr^{3+} (SCHACHTSCHABEL *et al.*, 1992).

4.2.3.3 Plomo

El Pb está considerado un elemento tóxico y frecuentemente detectado en suelos contaminados (LI & SCHUMAN, 1997), a pesar de que presenta una toxicidad mucho menor que el Cd.

En la corteza continental el contenido medio de Pb supone unos $15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ pudiendo alcanzar valores cercanos a $70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en los esquistos. ALLOWAY (1995) indica que los esquistos negros tienden a presentar niveles elevados de este elemento.

Es estable en dos estados de oxidación Pb^{2+} y Pb^{4+} , pudiendo el primero reemplazar isomórficamente al K^+ en los silicatos y al Ca^{2+} en carbonatos y apatito. Además, presenta gran afinidad por el azufre, por ello se concentra en minerales conjuntamente con este elemento, como es el caso de la galena (PbS) (ALLOWAY, 1995).

En suelos no contaminados el contenido oscila entre $2\text{-}60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y solamente en algunos casos se supera los $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. TABOADA CASTRO (2002) aprecia cantidades de Pb más elevadas, entre 57 y $255.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en suelos derivados de materiales de partida con composición heterogénea, llegando a la conclusión de que los suelos desarrollados sobre granito contenían los valores más elevados, lo que podría estar relacionado además de la composición de la roca con la proximidad de la zona de muestreo a áreas con intenso tráfico. En general, la concentración de Pb cerca de las carreteras desciende exponencialmente en función de la distancia, de manera que a pocos metros es inapreciable la deposición de este elemento (SCHACHTSCHABEL *et al.*, 1992)

Los contenidos elevados se asocian a las actividades humanas. En ciertas áreas mineras europeas por ejemplo, se han registrado contenidos de Pb de $4000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

El Pb alcanza el suelo básicamente a través del aire y las emisiones antropogénicas, en particular mediante el tráfico rodado, que son entre 20 y 30 veces superiores a las de origen natural inducidas por la actividad volcánica. Debido a su baja movilidad en el perfil, es común que se acumule en las capas más superficiales, fundamentalmente, a causa de su escasa solubilidad y fuerte adsorción (SCHACHSTSCHABEL *et al.*, 1992; ABREU *et al.*, 1998).

El Pb en el suelo se convierte en compuestos específicos, que son relativamente inmóviles. Los principales compartimentos de Pb en el suelo son la solución del mismo, la superficie de arcilla y humus del complejo de cambio (a la que el Pb se encuentra adsorbido), en los óxidos de Fe y Mn (como precipitado), así como en las capas de los silicatos (ALLOWAY, 1995). La solubilidad de este metal pesado depende del pH y de otros factores como son el contenido total del elemento, potencial redox, materia orgánica, entre otros (SCHACHTSCHABEL *et al.*, 1992). A un valor de pH mayor que 5, la solubilidad desciende y solamente a pH 4-4.5 se incrementa dicha solubilidad, y con ello la velocidad de transferencia de este elemento, la velocidad de desplazamiento en el perfil y la disponibilidad del mismo. En este rango de pH ácido, el contenido en Pb de la solución puede superar el límite de $0.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ establecido para aguas potables (SCHACHTSCHABEL *et al.*, 1992). La materia orgánica también disminuye la solubilidad del Pb, incluso en suelos muy ácidos. Como consecuencia de su escasa movilidad, el lavado del mismo en el perfil está muy limitado. De acuerdo con los balances efectuados, el 80% del Pb total se encuentra inmovilizado en los primeros 20 cm de suelo. Y por otro lado por su baja solubilidad el contenido total o la fracción que se encuentra adsorbida al complejo de cambio tiene muy poco alcance para estimar su disponibilidad.

4.2.3.4 Níquel

El Ni es un elemento que aparece en cantidades relativamente elevadas en la corteza terrestre, ROVERS *et al.* (1983) estiman que la media de éste en la litosfera está entre 2.94 y 3.96%. Para SCHACHTSCHABEL *et al.* (1992) el contenido medio de Ni en la corteza continental se sitúa en $45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, y en las rocas ultramáficas, con proporción elevada de olivino, así como serpentinas, pueden existir niveles de Ni superiores a $8000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

En la mayoría de los suelos naturales, su concentración de referencia oscila entre 5 y 50 mg·kg⁻¹. MITCHELL (1945) encontró más Ni en suelos procedentes de sedimentos arcillosos y rocas ígneas básicas (50 a 500 mg·kg⁻¹) que en aquellos derivados de arenisca, material calcáreo o roca ígnea ácida (<50 mg·kg⁻¹). SWAINE & MITCHELL (1960) mantienen que suelos sobre granito-gneis tienen contenidos más altos de Ni graníticos. Así estos autores llegan a la conclusión de que los suelos derivados de sedimentos arenosos presentaban los niveles más bajos de Ni total, en tanto que los derivados de roca básica, los mayores. GRAÑA *et al.* (1991) aportan valores de Ni total en suelos de distinto origen geológico entre 5 y 124 mg·kg⁻¹. TABOADA CASTRO (2002) observó que el contenido en Ni en suelos es altamente dependiente de la naturaleza del material de partida, viendo las mayores concentraciones, incluso superiores a los límites de tolerancia en suelos desarrollados en peridotita. Así pues, de estos estudios podemos concluir que el contenido de Ni está influenciado en gran manera por el material de partida.

El Ni en el suelo, si no es lavado, puede ser adsorbido o complejado por los minerales de arcilla o por la fracción orgánica. Otra parte del Ni puede estar asociada con menor fuerza a los silicatos. SCHACHTSCHABEL *et al.* (1992) observan que el Ni es adsorbido y forma complejos con los óxidos de Fe, Mn y Al, así como con los minerales de arcilla. LEE *et al.* (1997) sostienen que el Ni en el suelo puede estar asociado a la arcilla, dada la elevada correlación existente entre ambos. Una gran parte del Ni aportado al suelo por el agua de lluvia puede inmovilizarse integrándose en los minerales de arcilla y los óxidos. En la mayor parte del suelo, el contenido en Ni del agua de drenaje es muy bajo, entre 3-90 µg·L⁻¹. Sin embargo, en soluciones ricas en este elemento se determinaron concentraciones de 3.3 mg·L⁻¹, produciendo efectos tóxicos para la vegetación (SCHACHTSCHABEL *et al.* 1992).

KABATA-PENDIAS (2001) recoge valores de Ni en soluciones en horizontes superficiales de diversos suelos entre 3 y 25 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. El Ni puede encontrarse en el suelo en diferentes formas iónicas, como Ni^{2+} , NiOH^+ , y $\text{Ni}(\text{OH})_3$. La solubilidad de estas formas presenta un paralelismo notable con las del Cd y Zn, por lo que depende en gran medida de la reacción del suelo. Las formas solubles y asociadas al complejo de cambio se incrementan, sobre todo con pH menores de 5.5 (SCHACHTSCHABEL *et al.* 1992; ALLOWAY, 1995). Según ALLOWAY (1995), las formas NiOH^+ y Ni^{2+} son las que se muestran en la solución a pH superior a 8, mientras que en suelos ácidos las formas NiSO_4 y NiHPO_4 son las destacadas, en función de la proporción relativa de los niveles de SO_4^{2-} y PO_4^{3-} . A medida que desciende el pH, la disponibilidad de Ni aumenta y la movilidad vertical de este también se ve afectada. Algunos complejos órgano-minerales contribuyen a la movilización del Ni; TYLER y MCBRIDE (1982) mantienen que junto con el cobre tiene una gran tendencia a formar uniones covalentes muy fuertes con los ligandos orgánicos, siendo los responsables de su movilización.

4.3 MATERIAL & MÉTODOS

Para realizar el análisis de los distintos elementos del suelo, macronutrientes, micronutrientes y metales pesados, se llevaron a cabo extracciones con el agente quelante DTPA y la solución ácida Mehlich-3.

4.3.1 Extracción con la solución ácida Mehlich-3

La extracción y determinación de los elementos por este procedimiento es aplicable en un amplio rango de pH, de ácido a básico (SPAC, 1992). Para preparar dicha solución (MEHLICH, 1984) se emplearon como reactivos el nitrato amónico (NH_4NO_3), el fluoruro de amonio (NH_4F), el ácido nítrico (HNO_3), el ácido acético glacial (CH_3COOH) y el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), formulado de la siguiente manera: $(\text{HOOCCH}_2)_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_2\text{COOH})_2$. En el procedimiento Mehlich-3, el fósforo va a ser extraído por medio de una reacción que tiene lugar entre el ácido acético y componentes con flúor. Los cationes cambiabiles (calcio, magnesio, sodio, potasio) son extraídos debido a la acción de los nitratos de amonio y el ácido nítrico. Finalmente, los micronutrientes (hierro, cobre, manganeso, zinc) son extraídos por medio del NH_4 y del agente quelante EDTA.

Para llevar a cabo este procedimiento, primeramente, se prepara la disolución de fluoruro/EDTA, adicionando en un matraz de 1 L, 600 mL de agua, 138.9 g de NH_4F y 73.5 g de EDTA, mezclando y completando el volumen hasta un litro con agua destilada. A continuación, y utilizando un matraz de 5000 mL, se añaden 4000 mL de agua y 100 g de NH_4NO_3 y se disuelve. Se transfieren 20 mL de la disolución fluoruro/EDTA (preparada anteriormente) y, con la ayuda de un agitador, se facilita la disolución de los componentes añadidos. Se incorporan 57.5 mL de ácido acético y 4.1 mL de ácido nítrico concentrado. Se completa el volumen para 5000 mL con agua destilada y se determina el pH de la

disolución hasta alcanzar un valor de 2.5 añadiendo NaOH. Para llevar a cabo la extracción se toman 5 cm³ de TFSA y 50 mL de la disolución extractante llevándolos a frascos de polietileno, se tapan y se agitan 5 minutos en agitador circular horizontal a 240 rpm, tras los cuales se filtra el extracto en papel de filtro Whatman n° 42 y se leen las concentraciones de Mg, Ca, P, K, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr y Cd en ICP-AES modelo Jobin Yvon JY 50-P. Los resultados se expresan en mg·kg⁻¹.

4.3.2 Extracción con el agente quelante DTPA (0.005 mol L⁻¹)

El método DTPA (ácido dietilenotriaminopentaacético) está entre los más eficaces para evaluar la disponibilidad de micronutrientes y metales pesados en muestras de suelos debido a que resulta un método económico, reproducible, fácilmente adaptable a las operaciones rutinarias del laboratorio y, además de ello, los procedimientos para la preparación y extracción de las muestras están estandarizados (SOLTANPOUR *et al.*, 1976). El principio del método usando la solución de DTPA pH 7.3 desarrollado por LINDSAY & NORWELL (1978), es la complejación de los metales. El agente quelante reacciona con los iones libres de los metales en solución, formando complejos solubles, lo que resulta en una reducción de la actividad de los metales libres en solución. En respuesta, los iones son desorbidos de la superficie del suelo o se disuelven de la fase sólida para reabastecer a la solución del suelo. La cantidad de metal quelado que se acumula en la solución durante la extracción es una función de la actividad de esos iones libres en la solución del suelo (factor intensidad), de la capacidad del suelo para reabastecer a la solución (factor capacidad), de la estabilidad del quelato y de la capacidad del quelante en competir con la materia orgánica por el ión (RAIJ *et al.*, 2001).

El DTPA, formulado como (CHOCOCH₂)₂N(H₂)₂, se preparó disolviendo 7.84 g de DTPA (0.005 mol·L⁻¹) en agua destilada, agitando primero manualmente y luego con agitador para agilizar la disolución. Se adicionaron 60 mL de trietanolamina (TEA) y 5.88 g

de CaCl_2 . Se transfirió todo el contenido a un matraz de 4 L y se enrasó con agua. Posteriormente, se corrigió el pH de la disolución con, aproximadamente, 30 mL de HCl 6N hasta alcanzar un valor de pH de 7.3. Para realizar la extracción se tomaron 20 cm³ de TFSA en frascos de polietileno, se adicionaron 20 mL de la disolución extractora mediante dispensador, se taparon los frascos con parafilm o tapones de polietileno, se dispusieron en bandejas de aluminio con capacidad para 30 frascos y se agitaron durante 2 horas con rotación a 240 rpm en agitador circular horizontal. Conviene tener en cuenta que factores como el tiempo de agitación, la velocidad de agitación y la forma de extracción influyen en la cantidad de metales extraídos. De ahí que estos factores deben ser estandarizados en cada laboratorio o los niveles críticos para cada micronutriente podrían verse afectados. Pasado el tiempo, se filtró la suspensión por gravedad, con papel de filtro Whatman n° 42 y en el filtrado se determinó el Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr y Cd mediante espectrómetro de emisión atómica, ICP-AES, modelo Jobin Yvon JY 50-P. Los resultados vienen expresados en mg·kg⁻¹ tanto para el caso de los micronutrientes (Fe, Cu, Mn y Zn) como para el caso de los metales pesados (Cd, Cr, Ni y Pb).

El empleo de los espectrómetros ICP-AES se ha incrementado mucho en los últimos años, ya que permite el análisis multielemental de las muestras líquidas basadas en la emisión atómica. La muestra es aspirada por un flujo de argón, sufriendo nebulización y siendo arrastrada hasta un plasma de argón, el cuál es producido inductivamente por medio de una fuente de radiación electromagnética de alta frecuencia. En el plasma, las especies químicas sufren procesos similares a los citados anteriormente, emitiendo sus espectros de radiación característicos, al lado de un espectro continuo de radiación. Debido a las altas temperaturas del plasma, se minimizan las interferencias matriciales.

4.4 RESULTADOS & DISCUSIÓN

A continuación, se muestran los resultados del análisis estadístico de las propiedades químicas del suelo para las profundidades 0-20 cm, >20 cm y Horizonte A (según la profundidad exacta de muestreo), del suelo estudiado.

4.4.1 Profundidad de muestreo 0-20 cm

En la Tabla 4.2 se muestra la estadística correspondiente a las 80 muestras de los elementos estudiados, tanto los extraídos mediante el reactivo Mehlich-3 (Ca, P, K, Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Cr, Ni y Pb) como el DTPA (Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Cr, Ni y Pb). También se presenta los macronutrientes Ca y P, que fueron extraídos mediante resina.

Prop	Unidades	N	Media	Mediana	Moda	σ	Asimetría	Curtosis	Min	Max	C.V.
MEHLICH-3											
Ca	mg/kg	80	420.61	397.74	99.70	176.76	0.72	-0.04	99.70	864.69	42.02
P	mg/kg	80	135.79	131.65	120.53	45.93	0.51	0.33	44.93	263.51	33.82
K	mg/kg	80	60.19	53.30	43.40	28.74	2.25	6.14	28.00	185.97	47.75
Fe	mg/kg	80	345.46	346.51	246.64	49.62	-0.11	0.99	193.41	496.49	14.36
Mn	mg/kg	80	0.93	0.64	0.50	0.72	1.42	1.43	0.20	3.30	76.80
Cu	mg/kg	80	0.34	0.34	0.29	0.06	2.12	10.58	0.23	0.67	17.70
Zn	mg/kg	80	1.11	1.11	0.81	0.35	0.42	-0.41	0.48	2.06	31.74
Cd	mg/kg	80	0.06	0.06	0.05	0.01	0.52	-0.06	0.03	0.09	25.70
Cr	mg/kg	80	0.33	0.30	0.30	0.10	1.10	0.48	0.19	0.59	28.80
Ni	mg/kg	80	0.30	0.28	0.26	0.06	1.37	3.15	0.16	0.56	21.95
Pb	mg/kg	80	3.54	3.42	3.70	0.92	1.62	4.84	1.73	7.29	25.85
DTPA											
Fe	mg/kg	80	107.07	102.29	65.02	26.26	1.10	2.70	65.02	218.22	24.53
Mn	mg/kg	80	1.03	0.79	0.35	0.73	1.18	0.35	0.25	3.04	71.03
Cu	mg/kg	80	0.12	0.12	0.11	0.05	1.34	2.53	0.05	0.33	41.72
Zn	mg/kg	80	0.41	0.36	0.50	0.21	2.00	6.12	0.10	1.42	51.59
Cd	mg/kg	80	0.04	0.04	0.03	0.01	0.74	0.09	0.02	0.07	24.30
Cr	mg/kg	80	0.04	0.01	0.01	0.05	2.57	7.79	0.01	0.27	135.01
Ni	mg/kg	80	0.16	0.16	0.16	0.04	0.03	0.34	0.07	0.26	24.41
Pb	mg/kg	80	2.23	2.08	2.08	0.83	4.27	25.16	1.43	7.75	37.23
RESINA											
Ca	mg/kg	80	459.92	440.88	501.00	112.73	0.42	0.64	140.28	721.44	24.51
P	mg/kg	80	41.05	38.00	30	15.711	0.67	0.33	12	85	38.27

Tabla 4.2. Resultados estadísticos de los elementos extraídos a profundidad 0-20cm (N=número de muestras; Media, Mediana, Moda, σ =desviación típica; Asimetría, Curtosis, Min=Mínimo, Max=Máximo, C.V= coeficiente de variación).

Macronutrientes

El P presenta un contenido medio de $135.79 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción Mehlich-3 y un valor bastante menor, $41.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, en la extracción mediante resina. El rango en la extracción de Mehlich-3 oscila entre $44.93 - 263.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; y un rango de $12 - 85 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción por resina. LEMA (1998) considera que las concentraciones de P en los suelos gallegos se encuentra entre $18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} - 36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. PAZ-GONZÁLEZ *et al.*, (2000) encontraron en suelos sobre sedimentos terciario-cuaternario próximo a la parcela aquí estudiada, valores medios de P de $4.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para suelos con vegetación natural y de $58.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en suelos cultivados. El bajo pH de los suelos en Galicia, favorece las formas

solubles de hierro y aluminio que fijan el P soluble y dificultan su asimilación. La acidez del suelo provoca una mayor fijación del P (MUÑOZ TABOADELA, 1965); lo que sugiere que ha existido sobrefertilización de la parcela; dado que además de la fertilización mineral también se han añadido purines a la misma.

La tabla nos indica que el Ca es el macronutriente extraído en mayor cantidad con una valor medio de $420.61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, oscilando entre 99.70 y $864.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ extraído mediante el reactivo Mehlich-3 y con unos valores de $459.92 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, como valor medio, oscilando entre 140.28 y $721.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción mediante resina. LEMA (1998) sostiene que valores de Ca entre $2000 - 3000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ son adecuados para el desarrollo de los cultivos en Galicia. En la zona estudio para una profundidad de 0-20 cm existe una gran variación del contenido de este elemento, de acuerdo con los valores bajos de pH; la cantidad de Ca no es la suficiente para poder neutralizar la acidez del suelo. La carencia de Ca provoca que la materia orgánica tenga pH ácidos y se descomponga lentamente.

Los coeficientes de variación de los macronutrientes P y Ca son altos, tanto para la extracción realizada con el reactivo Mehlich-3: Ca (42.02%) y P (33.82%), como para la extracción con resina: Ca (24.51%) y P (38.27%).

Según los valores de asimetría y curtosis de los estos elementos, y atendiendo a la forma de los histogramas, Figura 4.3; tanto para la extracción con el reactivo Mehlich-3 como la extracción mediante resina asumimos la normalidad de los datos obtenidos para el Ca y el P.

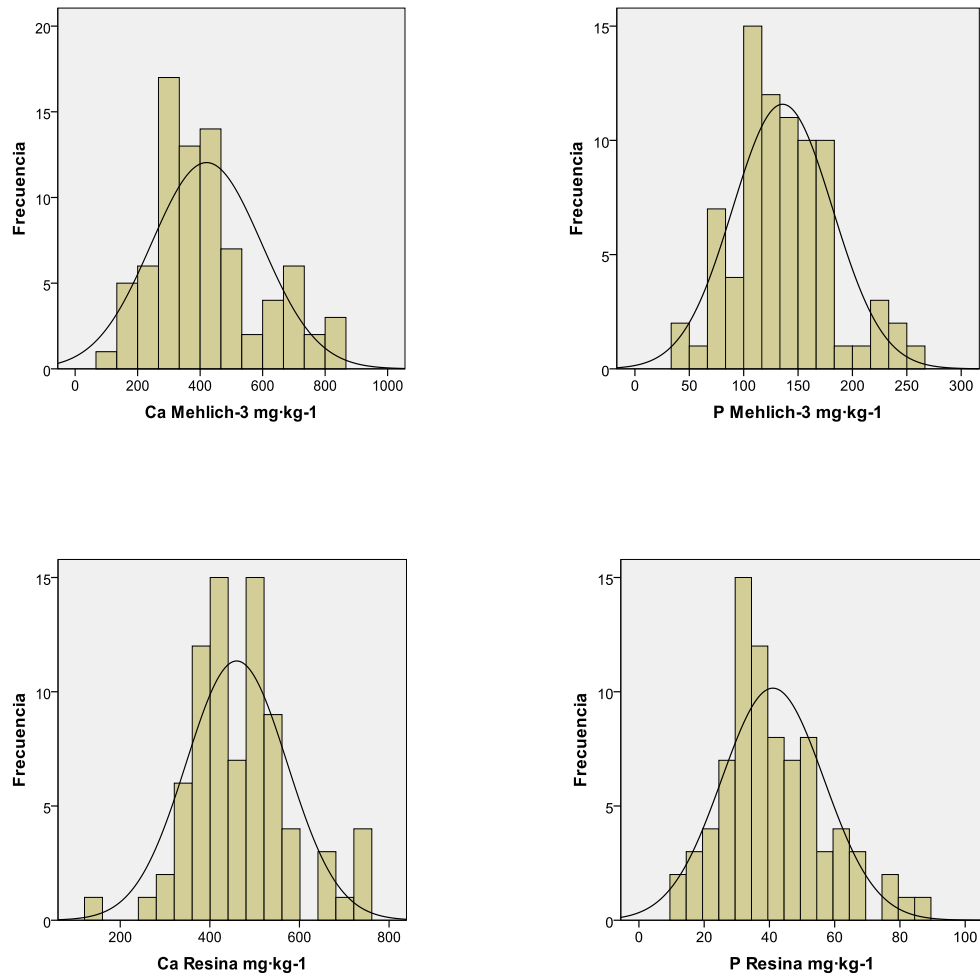


Figura 4.3.- Histogramas del contenido de Calcio y Fósforo, extraídos mediante Mehlich-3 y resina.

Las correlaciones lineales entre el Ca y el P están reflejadas en la Tabla 4.3.

Elemento	Ca (Mehlich)	P (Mehlich)	Ca (Resina)	P (Resina)
Ca (Mehlich)	1	0.28*	0.74**	
P (Mehlich)		1		0.86**
Ca (Resina)			1	
P (Resina)				1

Tabla 4.3.- Matriz de correlación entre los macronutrientes extraídos con Mehlich-3 y resina (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

Se observa una lógica correlación entre los mismos elementos extraídos de de diferente manera; el Ca extraído por Mehlich-3 tiene una correlación altamente significativa moderada de sentido positivo ($r=0.74$) con el Ca extraído por resina; por otro lado el P extraído por Mehlich-3 tiene una correlación altamente significativa fuerte de sentido positivo ($r=0.86$) con el P extraído por resina. Entre los distintos elementos aparece una única correlación, entre el Ca extraído por Mehlich-3 y el P Mehlich-3, siendo está únicamente significativa de sentido positivo y débil ($r=0.28$).

Las correlaciones lineales entre los macronutrientes y las principales propiedades generales del suelo se muestran en la Tabla 4.4.

Elemento/Propiedad	pH	MO	CIC	Arena	Limo	Arcilla
Ca (Mehlich)	0.34**	-0.24*	-0.24*			
P (Mehlich)	-0.25*	-0.27*				
Ca (Resina)	0.67**		-0.35**			0.23*
P (Resina)	-0.23*		0.25*			

Tabla 4.4.- Matriz de correlación entre los macronutrientes (extraídos con Mehlich-3 y resina) y las propiedades generales (* nivel de significación para $p<0.05$; ** nivel de significación para $p<0.01$).

Tanto el Ca extraído mediante Mehlich-3 como el obtenido por resina se correlacionan de manera muy similar; ambos tienen una correlación altamente significativa y positiva con el pH, si bien mientras que en la extracción por Mehlich-3 el coeficiente de correlación $r=0.34$, para la extracción mediante resina es $r=0.67$. Además se correlacionan en sentido negativo con la capacidad de intercambio catiónico (CIC), pero mientras la extracción mediante Mehlich-3 es una correlación únicamente significativa y débil ($r=-0.24$), para el Ca extraído mediante resina, la correlación es de alta significación, y también débil ($r=-0.35$). El Ca extraído por resina, además presenta una correlación únicamente significativa y de sentido positivo con la arcilla, siendo débil ($r=0.23$). El P presenta correlaciones débiles y solamente significativas, tanto para un método de extracción como

el otro; el $P_{\text{Mehlich-3}}$, tiene dos correlaciones de sentido negativo, con el pH ($r=-0.25$), contrariamente a lo que ocurriría con el Ca y otra con la MO ($r=-0.27$). El P_{resina} tiene una correlación de sentido negativo con el pH, también en este caso al contrario que el Ca, con un $r=-0.23$ y otra de sentido positivo con la capacidad de intercambio catiónico (CIC) ($r=0.25$).

Micronutrientes

En la Tabla 4.2 se muestra que el contenido en micronutrientes (Fe, Mn, Cu y Zn) ha sido determinado con dos soluciones extractantes Mehlich-3 y DTPA. Las cantidades extraídas mediante Mehlich-3 fueron mayores que con la solución DTPA, especialmente significativo en el caso del Fe, donde triplica la cantidad extraída. El micronutriente con mayor contenido medio extraído tanto por un método como por el otro ha sido el Fe ($345.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción con Mehlich-3 y $107.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción con DTPA); siendo además el elemento químico que presenta una cantidad media de extracción mayor después del Ca. Las cantidades medias de Mn en suelo estudiado son $0.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ extraído con Mehlich-3 y $1.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ extraído con DTPA; datos similares también los máximos y mínimos $0.20 - 3.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ con el reactivo Mehlich-3 y $0.25 - 3.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ extraído con DTPA. La cantidad media de Cu extraída mediante Mehlich-3 es mayor que la extracción con DTPA, $0.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ frente a $0.12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente; no alcanzando $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en ninguna de las muestras y por ninguno de los dos métodos de extracción. La cantidad media de Zn extraído es también mayor en la extracción con Mehlich-3, $1.11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ frente a $0.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En general se admite que la solución Mehlich-3 extrae, por término medio, mayores contenidos de estos cuatro elementos, Fe, Cu, Mn y Zn (CARIDAD CANCELA, 2002), lo que se puede atribuir al hecho de que la solución Mehlich-3 contiene compuestos de naturaleza ácida así como un quelato, por lo que debería ser capaz de solubilizar una mayor cantidad tanto de macronutrientes, micronutrientes como de metales pesados, dado que extrae no solo las formas más solubles

sino las retenidas con más energía en los coloides del suelo. Si bien, en este caso, no ocurre así para el caso del Mn.

Los niveles de Fe podemos considerarlos adecuados, se admite que un suelo está bien abastecido cuando el Fe extraído por DTPA oscila entre 20 - 150 mg·kg⁻¹ (SANDE FOUZ *et al.*, 2007). En el caso del Mn se considera que el suelo está bien abastecido, si el Mn extraído mediante DTPA se sitúa entre 8-80 mg·kg⁻¹ (ABREU *et al.*, 2005, SANDE FOUZ *et al.*, 2007), con lo cual el nivel de Mn en el área de estudio es muy bajo. Las cantidades de Cu son valores considerados bajos, puesto que deberían situarse en un intervalo de 0.2 a 0.3 mg·kg⁻¹ para Cu extraído por DTPA (SANDE FOUZ *et al.*, 2007). Por último y para el caso del Zn podemos considerar las cantidades extraídas como valores ligeramente bajos puesto que el intervalo adecuado para este micronutriente, extraído por DTPA sería de 0.5 – 1.8 mg·kg⁻¹ (SANDE FOUZ *et al.*, 2007). Respecto a los datos obtenidos con Mehlich-3, GALRÃO (2002) considera para suelos en Brasil, que valores de Cu, Mn y inferiores a 0.4 mg·kg⁻¹ y 1.9 mg·kg⁻¹ respectivamente son bajos; con lo cual el Cu y el Mn del área de estudio también lo serían. Mientras que los valores de Zn que se situasen en un intervalo de 1.1 – 1.6 mg·kg⁻¹, se considerarían medios.

Según indica la Tabla 4.2 los coeficientes de variación son diversos; el Fe y el Cu presentan los valores más bajos, 14.36% y 17.70% para la extracción con Mehlich-3 y 24.53% y 41.72% para DTPA respectivamente. El Zn queda en un lugar intermedio con 31.74% para Mehlich-3 y 51.59% para DTPA. Es el Mn quien presenta coeficientes de variación muy altos, 76.80% con Mehlich-3 y 71.03% con DTPA; siendo el elemento químico que mayor coeficiente de variación presenta para la extracción Mehlich-3, mientras que en la extracción con DTPA únicamente es superado por el Cr. El orden creciente de los coeficientes de variación sería el siguiente: Extracción por Mehlich-3: Fe<Cu<Zn<Mn extracción por DTPA: Fe<Cu<Zn<Mn.

Atendiendo a los coeficientes de asimetría y curtosis, así como los histogramas obtenidos, Figura 4.4 y Figura 4.5; para los datos obtenidos por la extracción DTPA no podemos asumir la normalidad de los datos de ninguno de los elementos. Por el contrario en la extracción con Mehlich-3, el Zn y el Fe pueden considerarse cercanos a la normalidad.

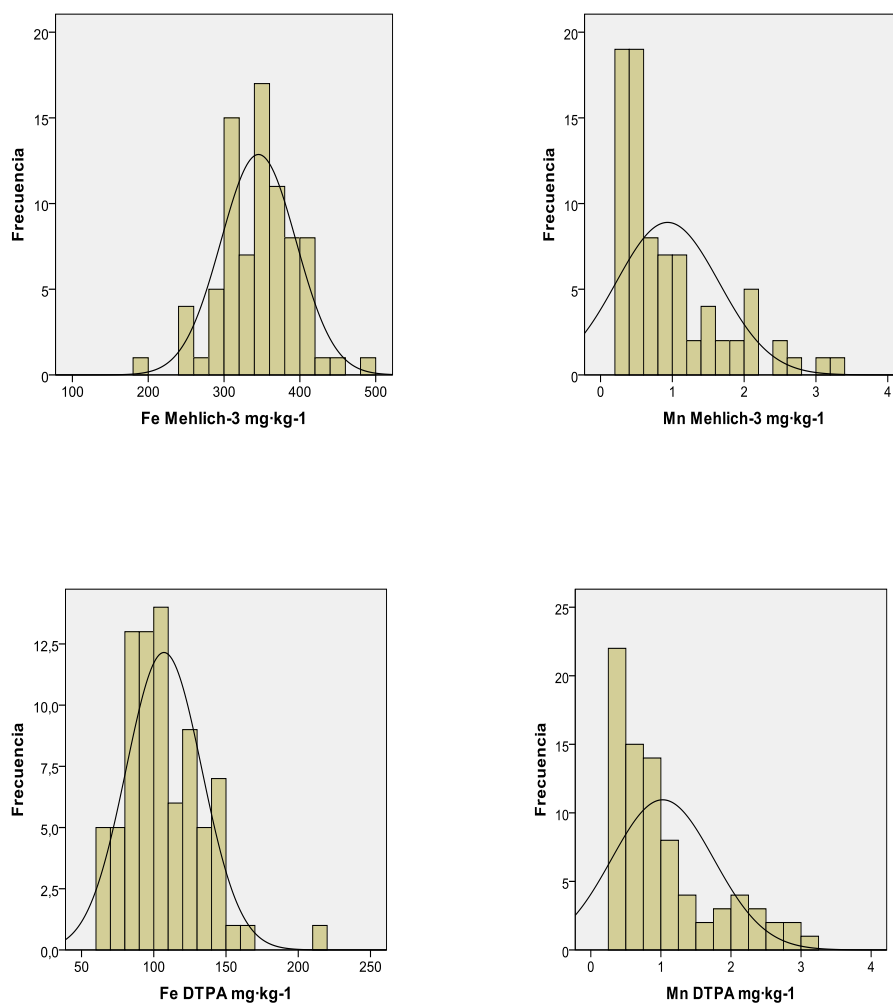


Figura 4.4.- Histogramas del contenido de Hierro y Manganeso, extraídos mediante Mehlich-3 y DTPA.

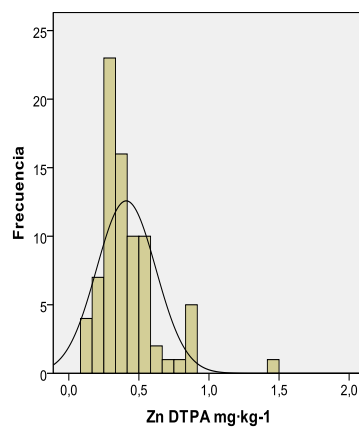
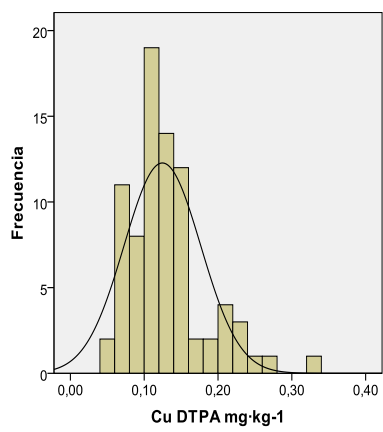
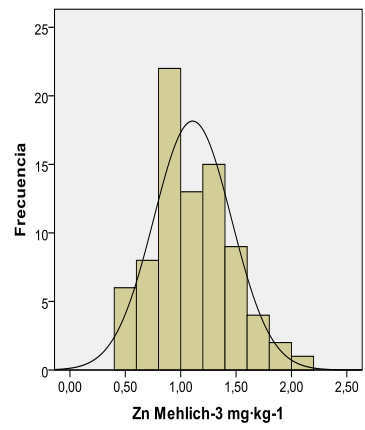
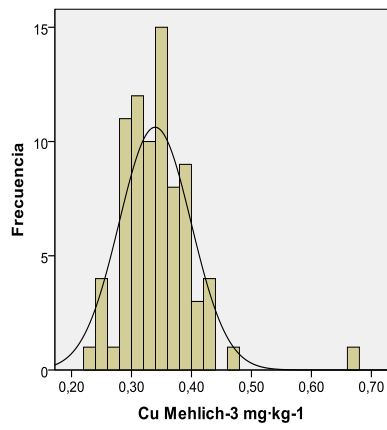


Figura 4.5.- Histogramas del contenido de Cobre y Zinc, extraídos mediante Mehlich-3 y DTPA.

Las correlaciones lineales entre los micronutrientes están reflejadas en la Tablas 4.5.

Mehlich-3				
Elemento	Fe	Mn	Cu	Zn
Fe	1			
Mn		1		
Cu			1	0.30**
Zn				1
DTPA				
Elemento	Fe	Mn	Cu	Zn
Fe	1	0.30**		
Mn		1		
Cu			1	0.46**
Zn				1
Mehlich-3 - DTPA				
Elemento	Fe (DTPA)	Mn (DTPA)	Cu (DTPA)	Zn(DTPA)
Fe (Mehlich-3)	0.63**			
Mn (Mehlich-3)		0.96**		
Cu (Mehlich-3)			0.63**	
Zn (Mehlich-3)			0.24*	0.61**

Tabla 4.5.- Matriz de correlación entre los micronutrientes extraídos con Mehlich-3 y con DTPA (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

En la matriz de correlaciones mostrada en la Tabla 4.5 se observa que para la extracción con Mehlich-3 únicamente aparece una correlación altamente significativa, de signo positivo y débil entre el Cu y Zn con un coeficiente de correlación $r=0.30$. Mientras que en la extracción por DTPA existe una correlación altamente significativa, positiva y débil entre Fe y Mn ($r=0.30$) y otra correlación altamente significativa, positiva y débil entre el Cu y el Zn con un coeficiente de correlación $r=0.46$. En la matriz que relaciona ambas extracciones, Mehlich-3 y DTPA, cada elemento extraído se correlaciona consigo mismo en la otra extracción; siendo para todos los casos correlaciones altamente

significativas y de signo positivo: el Fe extraído por Mehlich-3 tiene un coeficiente de correlación moderado ($r=0.63$) con el Fe extraído por DTPA, y esto mismo puede decirse para el Cu y el Zn, con coeficientes de correlación $r=0.63$ y $r=0.61$ respectivamente. Por su parte el Mn extraído por Mehlich-3 tiene un coeficiente de correlación muy alta ($r=0.96$) con el Mn extraído por DTPA.

Las correlaciones lineales entre los micronutrientes y los macronutrientes están reflejadas en la Tabla 4.6.

	Mehlich-3		Resina	
Mehlich-3	Ca	P	Ca	P
Fe				
Mn	0.26*		0.45**	
Cu	0.34**	0.36**	0.28*	0.27*
Zn	0.30**	0.51**		0.47**
	Mehlich-3		Resina	
DTPA	Ca	P	Ca	P
Fe				
Mn			0.39**	
Cu		0.32**		0.32**
Zn		0.46**		0.53**

Tabla 4.6.- Matriz de correlación entre los micronutrientes y macronutrientes extraídos con Mehlich-3, resina y con DTPA (* nivel de significación para $p<0.05$; ** nivel de significación para $p<0.01$).

En la Tabla 4.6 donde se muestran las correlaciones lineales entre los micronutrientes y los macronutrientes, se observa que el Fe, tanto en la extracción por Mehlich-3 como por DTPA, no tiene ninguna correlación significativa con Ca y P. El Mn extraído mediante Mehlich-3 tiene una correlación lineal únicamente significativa de sentido positivo y débil ($r=0.26$) con el Ca extraído con Mehlich-3 y otra correlación altamente significativa de sentido positivo con un $r=0.45$, con el Ca extraído mediante resina. Por otro lado el Mn extraído con DTPA tiene una coeficiente de correlación $r=0.39$, con el Ca extraído por resina, siendo esta de sentido positivo y altamente significativa. El

Cu es elemento que presenta un mayor número de correlaciones con los macronutrientes, aunque no las más fuertes. El Cu extraído mediante Mehlich-3 presenta unos coeficientes de correlación $r=0.34$ y $r=0.36$, de alta significación, con el Ca y el P extraídos mediante Mehlich-3, y una correlación únicamente significativa y de sentido positivo con el Ca y el P extraídos mediante resina, con unos coeficientes de correlación débiles, $r=0.28$ y $r=0.27$ respectivamente. El Cu obtenido mediante DTPA presenta unos coeficientes de correlación de $r=0.32$ con el P tanto para el extraído mediante Mehlich-3 como para la extracción por resina, en ambos casos una correlación de alta significación y sentido positivo. El Zn es elemento que presenta relaciones lineales más fuertes, todas ellas de sentido positivo y de alta significación. El Zn extraído mediante Mehlich-3 tiene unos coeficientes de correlación de $r=0.30$ y $r=0.51$ con el Ca y P extraídos por Mehlich-3 respectivamente; y un coeficiente de correlación del $r=0.47$ para el P extraído por resina. El Zn obtenido por DTPA por otro lado presenta una relación lineal con el P obtenido por Mehlich-3 con un $r=0.46$ (para un $p<0.01$) y un coeficiente de correlación moderado $r=0.53$ con el P extraído por resina, siendo este último la relación lineal más fuerte de los micronutrientes y macronutrientes estudiados.

Las correlaciones lineales entre los micronutrientes y las propiedades generales se muestran en las Tabla 4.7.

Elemento/Propiedad	pH	MO	CIC	Arena	Limo	Arcilla
Fe(Mehlich-3)						
Mn (Mehlich-3)	0.30**					
Cu(Mehlich-3)				-0.28*		0.34**
Zn(Mehlich-3)						
Fe(DTPA)						
Mn(DTPA)	0.26*					
Cu(DTPA)						
Zn(DTPA)						

Tabla 4.7.- Matriz de correlación entre los micronutrientes (extraídos con Mehlich-3 y con DTPA) y las propiedades generales (*nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

El Fe y el Zn bien hayan sido extraídos por Mehlich-3 o bien por DTPA, no presenta ninguna correlación lineal con las propiedades generales. El Mn obtenido mediante Mehlich-3 tiene una correlación lineal altamente significativa y de sentido positivo, con un coeficiente de correlación $r=0.30$ con el pH, frente al obtenido mediante DTPA cuya correlación positiva con el pH es únicamente significativa y con un coeficiente de correlación $r=0.26$. Por su parte el Cu extraído por Mehlich-3 tiene una correlación de signo negativo, solamente significativa y débil con la arena ($r=-0.28$); y otra una correlación de signo positivo, altamente significativa, con un $r=0.34$ con la arcilla.

Metales Pesados

Se han tenido en cuenta para este estudio los siguientes metales pesados: Cd, Cr, Ni y Pb. Realizándose también su determinación utilizando los dos reactivos, Mehlich-3 y DTPA. Las cantidades extraídas están reflejadas en la Tabla 4.2. Mediante la extracción por Mehlich-3 las cantidades son mayores para los cuatro metales en cuestión. La concentración de los metales pesados determinados por cualquiera de los dos métodos queda lejos de los valores considerados tóxicos.

El Cd presenta un contenido medio $0.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ extraído con Mehlich-3 y $0.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ extraído con DTPA, siendo los intervalos entre $0.03 - 0.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción por Mehlich-3 y entre $0.02 - 0.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción por DTPA. El Cr en la extracción por Mehlich-3 posee un valor medio de $0.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, oscilando entre un mínimo de $0.19 - 0.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; y en el caso de la extracción por DTPA, el valor medio es de $0.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, sin embargo el rango es muy amplio, $0.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} - 0.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. El Ni extraído mediante Mehlich-3 presenta unas cantidades considerablemente superiores a las obtenidas por DTPA, $0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ frente a los $0.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, moviéndose en unos intervalos de $0.16 - 0.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ el Ni_(Mehlich-3) y $0.07 - 0.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ el Ni_(DTPA). El Pb es el metal pesado extraído en una mayor cantidad, con un valor medio de $3.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción con Mehlich-3 y $2.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción mediante DTPA. Siendo los intervalos de $1.73 - 7.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para Pb_(Mehlich-3) y de $1.43 - 7.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para el Pb_(DTPA).

Los niveles de Cd podemos decir que son adecuados para el suelo, BOWIE & THORNTON, 1985, consideran valores anómalos de Cd por encima de $30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, si bien para suelos agrícolas con pH inferior a 7, el valor máximo aceptado sería de $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (AGUILAR *et al.*, 1999). En el caso del Cr se considera que el suelo agrícola no está en riesgo, si el Cr extraído se sitúa por debajo de $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (AGUILAR *et al.*, 1999), con lo cual el nivel de Cr en el área de estudio se consideraría adecuado. Las cantidades de Ni son valores considerados no peligrosos, dado que en suelos agrícolas con pH inferiores a 7 la concentración máxima permitida según AGUILAR *et al.*, 1999 sería de $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En el caso del Pb, el metal pesado extraído en mayor cantidad, tampoco las concentraciones obtenidas se considerarían peligrosas para suelos agrícolas que tuviesen $\text{pH} < 7$; en este caso la concentración máxima admitida es $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (AGUILAR *et al.*, 1999).

El Cd presenta unos coeficientes de variación similares para las dos extracciones, 25.70% para el Mehlich-3 y 24.30% para DTPA, El Cr presenta valores más dispares

comparando las dos extracciones; un coeficiente de variación de 28.80% para Mehlich-3, mientras que en la extracción por DTPA presenta un coeficiente de variación de 135%, siendo este el más alto de todos los elementos químicos estudiados. El Ni es elemento que tiene menores coeficientes de variación de los metales pesados, 21.95% para la extracción con Mehlich-3 y 24.41% en la extracción mediante DTPA. Por último el Pb tiene unos coeficientes de variación de 25.85% para Mehlich-3 y 37.23% para DTPA. El orden creciente de los coeficientes de variación sería el siguiente: Extracción por Mehlich-3: Ni<Cd<Pb<Cr, extracción por DTPA: Cd<Ni<Pb<Cr.

Atendiendo a los histogramas (Figuras 4.6 y Figura 4.7), coeficientes de asimetría, curtosis y los histogramas de las distribuciones de frecuencia, en la extracción por Mehlich-3 de los metales pesados; no se puede asumir la normalidad de los datos en el caso del Cr. Para la extracción con DTPA, ni el Cr ni el Pb presentan normalidad en sus datos.

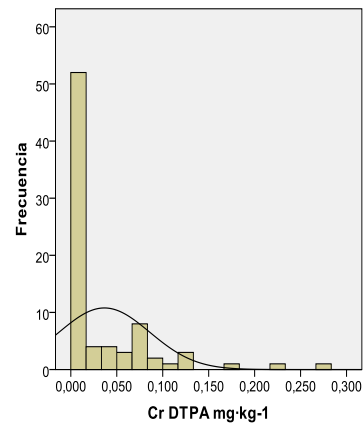
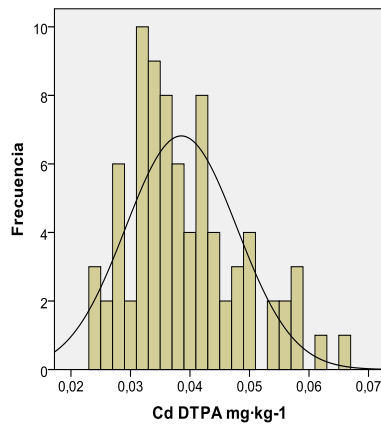
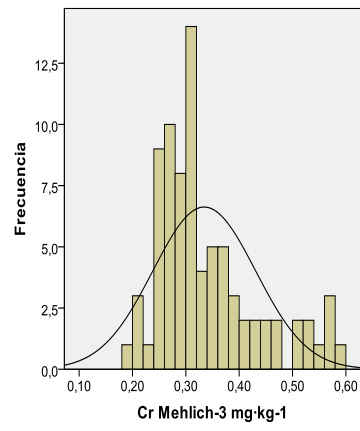
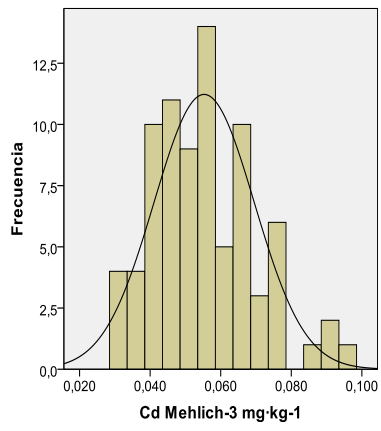


Figura 4.6.- Histogramas del contenido de Cadmio y Cromo, extraídos mediante Mehlich-3 y DTPA.

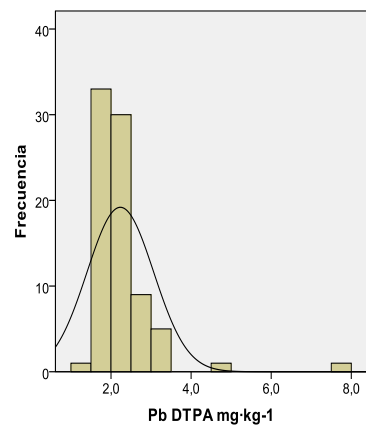
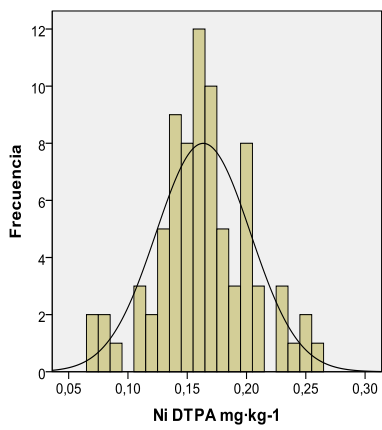
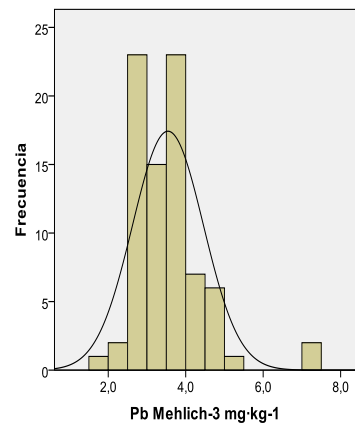
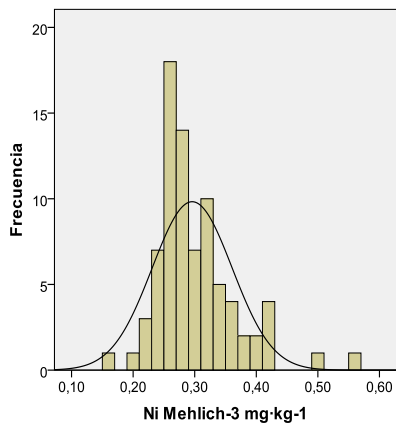


Figura 4.7.- Histogramas del contenido de Níquel y Plomo, extraídos mediante Mehlich-3 y DTPA.

La matriz de correlaciones entre los metales pesados se muestra en la Tabla 4.8.

Mehlich-3				
Elemento	Cd	Cr	Ni	Pb
Cd	1	0.27*	0.58**	
Cr		1	0.45**	
Ni			1	
Pb				1
DTPA				
Elemento	Cd	Cr	Ni	Pb
Cd	1	0.30**	0.27*	
Cr		1	-0.52**	
Ni			1	
Pb				1
Mehlich-3 - DTPA				
Elemento	Cd (DTPA)	Cr (DTPA)	Ni (DTPA)	Pb(DTPA)
Cd (Mehlich-3)	0.86**		0.26*	
Cr (Mehlich-3)				
Ni (Mehlich-3)	0.41**		0.56*	
Pb (Mehlich-3)				0.88**

Tabla 4.8.- Matriz de correlación entre los metales pesados extraídos con Mehlich-3 y con DTPA (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

El Pb no muestra relaciones significativas con ninguno de los demás metales pesados, tanto para una extracción como para la otra, únicamente tiene una correlación altamente significativa y positiva, entre el Pb extraído por Mehlich-3 y el Pb extraído mediante DTPA, con un coeficiente de correlación $r = 0.88$. En la extracción Mehlich-3 existe una correlación entre el del Cd y el Cr, únicamente significativa y positiva, con un $r = 0.27$ y otras correlaciones altamente significativas y positivas moderadas; Cd-Ni $r = 0.58$ y Cr-Ni $r = 0.45$. En cuanto a la extracción por DTPA, aparecen correlaciones lineales; únicamente significativa y débil para la relación Cd-Ni, con un $r = 0.27$ y altamente significativa positiva para los casos Cd-Cr, con un $r = 0.30$; la relación Cr-Ni es altamente significativa y negativa moderada, con un coeficiente de correlación $r = -0.52$. En cuanto a las relaciones lineales entre los elementos extraídos por ambos métodos: el $Cd_{\text{Mehlich-3}}$ está

correlacionado linealmente con alta significación y sentido positivo con el Cd_{DTPA} , siendo una relación fuerte $r=0.86$ y además de manera débil ($r=0.27$) y positiva con el Ni_{DTPA} ; siendo esta relación solamente significativa. El $Ni_{Mehlich-3}$ tiene una correlación moderada ($r=0.56$) y positiva de alta significación con el Ni_{DTPA} .

La matriz de correlaciones entre los metales pesados y los macronutrientes se muestra en la Tabla 4.9.

	Mehlich-3		Resina	
Mehlich-3	Ca	P	Ca	P
Cd	0.22*	0.70**		0.62**
Cr				
Ni	0.24*	0.48**		0.48**
Pb				
	Mehlich-3		Resina	
DTPA	Ca	P	Ca	P
Cd		0.62**		0.66**
Cr				
Ni		0.47**		0.37**
Pb				

Tabla 4.9.- Matriz de correlación entre los metales pesados y los macronutrientes extraídos con Mehlich-3 y con DTPA (* nivel de significación para $p<0.05$; ** nivel de significación para $p<0.01$).

La relación metales pesados y macronutrientes se muestra en la Tabla 4.9. Son el Cd y el Ni los únicos elementos que presentan correlaciones lineales significativas. El Cd y el Ni extraídos con Mehlich-3 o con DTPA tienen correlaciones fuertes con el P (extraído con Mehlich-3 y con Resina) y una correlación solo significativa con el Ca extraído con Mehlich-3. La correlación más fuertes es entre el Cd y el P extraídos con Mehlich-3, con un coeficiente de correlación $r=0.70$ (para un $p<0.01$).

La matriz de correlaciones entre los metales pesados y los micronutrientes se muestra en la Tabla 4.10.

	Mehlich-3				DTPA			
Mehlich-3	Fe	Mn	Cu	Zn	Fe	Mn	Cu	Zn
Cd			0.30**	0.27*	0.29**		0.26*	
Cr	0.22*			0.35**				
Ni			0.32**	0.37**				
Pb								
	Mehlich-3				DTPA			
DTPA	Fe	Mn	Cu	Zn	Fe	Mn	Cu	Zn
Cd			0.40**		0.40**		0.38**	0.30**
Cr					0.44**			
Ni			0.39**				0.31**	
Pb								

Tabla 4.10. Matriz de correlación entre los metales pesados y los micronutrientes extraídos con Mehlich-3 y con DTPA (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

El Pb es el único elemento que no presenta correlación significativa con alguno de los micronutrientes. Del resto de correlaciones destaca la del Cd y el Fe, ambos extraídos por DTPA, que presenta un coeficiente de correlación de $r=0.40$ (para un $p < 0.01$) y la del Cr y el Fe, también extraídos por DTPA, con una correlación lineal de $r=0.44$ (para un $p < 0.01$).

La matriz de correlaciones entre los metales pesados y las propiedades generales se muestra en la Tabla 4.11.

Elemento/Propiedad	pH	MO	CIC	Arena	Limo	Arcilla
Cd(Mehlich-3)	-0.37**	-0.42**		-0.12*		0.25*
Cr(Mehlich-3)	-0.39**	-0.44**	0.25*	0.27**	-0.38**	
Ni(Mehlich-3)	-0.51**	-0.38**	0.30**			0.25*
Pb(Mehlich-3)				-0.29**	0.28*	0.24*
Cd (DTPA)		-0.23*		-0.22*		0.29*
Cr(DTPA)						-0.29*
Ni(DTPA)				-0.34**		0.45**
Pb(DTPA)						

Tabla 4.11. Matriz de correlación entre los metales pesados (extraídos con Mehlich-3 y con DTPA) y las propiedades generales (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

Los metales pesados presentan un número mayor de correlaciones con las propiedades generales que los micronutrientes; siendo más numerosas las correlaciones en el caso de los metales pesados extraídos mediante Mehlich-3.

El Cd extraído por Mehlich-3 presenta dos correlaciones lineales altamente significativas y de sentido negativo, con el pH y la materia orgánica, con unos coeficientes de correlación $r = -0.37$ y $r = -0.42$ respectivamente; y otras dos correlaciones solamente significativas, negativa y débil ($r = -0.12$) con la arena y positiva con la arcilla con ($r = 0.25$). El Cd extraído mediante DTPA, tiene tres correlaciones lineales con las propiedades generales, siendo estas únicamente significativas, y débiles; de signo negativo con la materia orgánica y la arena ($r = -0.23$ y $r = -0.22$, respectivamente) y otra de signo positivo con la arcilla, con un coeficiente de correlación $r = 0.29$. El Cr extraído por Mehlich-3 presenta tres correlaciones lineales altamente significativas y de sentido negativo, con el pH, la materia orgánica y el limo, con unos coeficientes de correlación moderados, $r = -0.39$, $r = -0.44$ y $r = -0.38$ respectivamente; y presenta una correlación lineal de sentido positivo altamente significativa de $r = 0.27$ con la arena. Además, se correlaciona linealmente con la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de forma solamente significativa, de sentido positivo, con

un coeficiente de correlación $r=0.25$. Por otra parte, el Cr obtenido mediante DTPA presenta una correlación solamente significativa, de sentido negativo y débil ($r=-0.29$) con la arcilla. El Ni extraído mediante Mehlich-3 tiene tres relaciones lineales altamente significativas y una únicamente significativa con las propiedades generales. De esas tres primeras correlaciones dos son de sentido negativo, con el pH, con un $r=-0.51$ y con la materia orgánica cuyo coeficiente de correlación es $r=-0.38$. La otra correlación de alta significación y sentido positivo es con la capacidad de intercambio catiónico (CIC), siendo está débil ($r=0.30$). La relación únicamente significativa es con la arcilla, siendo de sentido positivo con un coeficiente de correlación $r=0.25$. El Ni obtenido por DTPA tiene una correlación de alta significación y positiva con la arcilla, con un $r=0.45$; y una correlación de alta significación y negativa con la arena ($r=-0.34$). Por último el Pb es el elemento que menos correlaciones tiene con las propiedades generales; no presentando ninguna el Pb_{DTPA} . El $Pb_{Mehlich-3}$ tiene una única correlación lineal de alta significación (negativa), con la arena ($r=-0.29$); y dos correlaciones únicamente significativas (positivas ambas), con el limo y la arcilla, siendo sus coeficientes de correlación $r=0.28$ y $r=0.24$ respectivamente.

Análisis de componentes principales (Mehlich-3)

	CP1	CP2	CP3
Autovalores	2.358	1.402	1.118
Proporción Varianza	0.295	0.175	0.14
Varianza acumulada	0.295	0.47	0.61
Variables del CP			
Cd	0.747**	-0.201	-0.014
Cr	0.613**	0.500**	-0.300**
Ni	0.829**	-0.007	-0.145
Pb	0.091	-0.658**	0.255*
Cu	0.489**	-0.543**	0.282*
Fe	0.227*	0.547**	0.418**
Mn	-0.068	0.271*	0.811**
Zn	0.659**	0.105	0.173
Correlaciones CPsQuímica, altura, CPs Pgenerales y CPsTopografía			
Altura	-0.435**	0.229*	0.313**
CPG1	-	-0.234*	0.479**
CPG2	-	-0.360**	-
CPG3	-	-	-
CPG4	0.580**	-	-
CPT1	-0.338**	-	0.258*
CPT2	-	-	-

Tabla 4.12. Componentes Principales de los elementos extraídos con Mehlich-3 a profundidad 0-20cm. (* nivel de significación para $p<0.05$; ** nivel de significación para $p<0.01$).

En la Tabla 4.12 se muestra es análisis de componentes principales realizado de las propiedades químicas extraídas mediante Mehlich-3 de la zona de estudio. Se observa que el 61% de la variabilidad de los datos quedan explicados mediante tres componentes principales (CP) con autovalores superiores a 1.

El primer componente, **CP₁**, explica el 29% de la variabilidad, en el cual, el Ni, el Cd, el Zn el Cr, el Cu y el Fe (este en menor medida) se asocian, participando en el componente todos ellos con signo positivo. El **CP₂** explica un 17.5% adicional de la variabilidad, siendo en este caso el orden decreciente de los pesos de los elementos en el

componente el siguiente: $Pb > Fe > Cu > Cr > Mn$. El Pb y el Cu se asocian con signo negativo mientras que Fe, Cr y Mn lo hacen con signo positivo; por lo tanto el Pb y el Cu muestran una tendencia a decrecer cuando aumentan Fe, Cr y Mn. El tercer componente, **CP₃** explica un 14% más de la variabilidad, siendo el Mn el elemento con peso más destacado en el componente; intervienen además Fe, Cr, Cu y Pb. El Mn aparece asociado con el Fe, Pb y Cu con signo positivo, mientras que el Cr presenta signo contrario, decrece al aumentar el resto de elementos destacables del componente.

El CP₁ presenta correlaciones altamente significativas con la altura (sentido negativo, $r = -0.43$), el componente principal CPG₄ de las propiedades generales (donde la MO era el elemento predominante, $r = 0.58$) y con el componente principal de la topografía CPT₁ ($r = -0.34$). El CP₂ se correlaciona con el componente CPG₂ de las propiedades generales (en el cual destacan las fracciones granulométricas, $r = -0.36$). Por último el CP₃ tiene correlaciones altamente significativas con la altura ($r = 0.31$) y con el componente principal CPG₁ de las propiedades generales ($r = 0.48$).

Los 3 componentes principales explican con una proporción moderada la variabilidad total de los datos. Además, en general, la correlación con las variables topográficas, en particular con la altura, si bien es significativa tiene presente una notable dispersión. El CP₁ en el cual están asociados 6 de los 8 elementos traza estudiados (la excepción son Mn y Pb) presenta una correlación negativa con la altura. Este resultado podría indicar que los elementos traza extraídos con Mehlich-3 asociados en el CP₁, tienden a acumularse en las hondonadas del microrelieve. Los resultados del CP₂ y CP₃ podrían indicar que también el $Pb_{Mehlich-3}$ tiende a acumularse en las zonas bajas de la parcela mientras que el $Mn_{Mehlich-3}$ muestra tendencia a situarse en las zonas más altas de la misma.

Las correlaciones entre los componentes principales de los 8 elementos traza y los componentes principales de las propiedades generales y topografía, sólo son significativas en algunos casos. Estas correlaciones no aportaron información más detallada que la proporcionada por el análisis univariante.

Análisis de componentes principales (DTPA)

	CP1	CP2	CP3
Autovalores	2.189	1.808	1.095
Proporción Varianza	0.274	0.226	0.137
Varianza acumulada	0.274	0.50	0.636
Variables del CP			
Cd	0.774**	0.028	0.222*
Cr	0.317**	0.841**	-0.033
Ni	0.334**	-0.764**	0.144
Pb	0.167	-0.045	0.884**
Cu	0.635**	-0.432**	-0.185
Fe	0.624**	0.488**	0.135
Mn	0.370**	0.213	-0.235*
Zn	0.648**	-0.208	-0.366**
Correlaciones CPsQuímica, altura, CPs Pgenerales y CPsTopografía			
Altura	-	-	-0.251*
CPG1	-	-	-
CPG2	0.229*	-0.277*	-
CPG3	-	-	-0.327**
CPG4	-	-	-
CPT1	-	-	-
CPT2	-	-	-

Tabla 4.13. Componentes Principales de los elementos extraídos con DTPA a profundidad 0-20cm. (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

En la Tabla 4.13 se muestra el análisis de componentes principales realizado de las propiedades químicas extraídas mediante DTPA de la zona de estudio. Se observa que el 63% de la variabilidad de los datos quedan explicados mediante tres componentes principales (CP) con autovalores superiores a 1.

El primer componente, **CP₁**, explica el 27% de la variabilidad, en el cual todos los elementos estudiados participan en el componente salvo el Pb. El orden decreciente de los pesos específicos en el CP₁ es: Cd>Zn>Cu>Fe>Mn>Ni>Cr. Todos los elementos se asocian entre sí con signo positivo. El **CP₂** explica un 22.6% adicional de la variabilidad, asociándose el Cr y el Fe con signo positivo frente a la asociación negativa de Ni y Cu; la tendencia es por tanto que aumenta el Cr y el Fe al disminuir el Ni y el Cu. El tercer componente (**CP₃**) explica un 13.6% adicional de la variabilidad, y en este caso es el Pb el elemento con un mayor peso específico en el componente, seguido de Zn, Cd y Mn. Pb y Cd participan en el componente con signo positivo y por el contrario Zn y Mn lo hacen son negativo.

El CP₁ no presenta correlaciones altamente significativas con la altura, conductividad eléctrica aparente, componentes principales de las propiedades generales o componentes principales de la topografía; a diferencia de lo que ocurría en la extracción mediante Mehlich-3. El CP₂ tampoco presenta correlaciones altamente significativas. Ambos presentan una correlación únicamente significativa y débil con el CPG₂; positiva en el caso del CP₁ y de signo negativo en el caso del CP₂. Aparece una correlación altamente significativa entre el CP₃ y el CPG₃ (donde la MO, el K y el Mg eran los elementos con mayor peso, $r=-0.33$).

Al igual que en la extracción mediante Mehlich-3, el estudio de componentes principales solamente explica una porción moderada de la variabilidad total de los datos.

Además comparando las tablas 4.12 y 4.13 se aprecian algunas similitudes, pero también notables diferencias entre el grado de asociación de los 8 elementos traza estudiados.

En el CP₁ para la extracción por DTPA están asociados 7 de los 8 elementos traza y al igual que en la extracción por Mehlich-3 el Pb es la excepción, aunque no el Mn. En el CP₂ se aprecia que el Ni presenta una fuerte asociación mientras que el Pb no contribuye al componente. En el CP₃ el elemento de mayor peso es el Pb en el caso de la extracción DTPA y lo es el Mn en el caso del CP₃ en la extracción por Mehlich-3.

Las correlaciones entre los componentes principales de los elementos traza (DTPA) y los componentes principales de las propiedades generales y topográficas, son si cabe menores que las obtenidas en la extracción por Mehlich-3; lo que corrobora lo que se pone de manifiesto en la Tabla 4.11.

En consecuencia el estudio de los componentes principales confirma que lo extraído con Mehlich-3 y DTPA corresponde a distintas formas químicas.

4.4.2 Profundidad de muestreo >20 cm

En la Tabla 4.14 se muestra la estadística correspondiente a las 80 muestras de los elementos estudiados, tanto los extraídos mediante el reactivo Mehlich-3 como el DTPA.

Así mismo se muestran los macronutrientes Ca y P, que fueron extraídos mediante resina.

Prop	Unidades	N	Media	Mediana	Moda	σ	Asimetría	Curtosis	Min	Max	C.V.
MEHLICH-3											
Ca	mg/kg	80	677.48	660.48	180.52	243.06	0.67	0.90	180.52	1471.35	35.88
P	mg/kg	80	78.65	75.76	24.16	29.08	0.47	-0.01	24.16	155.00	36.97
K	mg/kg	80	56.86	55.16	62.23	20.26	0.96	2.56	13.36	137.21	35.63
Fe	mg/kg	80	366.96	363.47	153.93	82.20	0.08	-0.28	153.93	528.09	22.40
Mn	mg/kg	80	1.76	1.31	0.36	1.42	1.20	1.38	0.24	6.91	80.37
Cu	mg/kg	80	0.31	0.31	0.27	0.07	1.02	4.99	0.12	0.64	23.25
Zn	mg/kg	80	1.31	1.03	1.31	0.84	2.65	7.76	0.51	4.83	64.32
Cd	mg/kg	80	0.05	0.05	0.05	0.01	0.73	1.73	0.03	0.09	21.00
Cr	mg/kg	80	0.52	0.52	0.52	0.13	0.16	2.95	0.05	0.95	25.36
Ni	mg/kg	80	0.30	0.29	0.28	0.07	1.01	2.86	0.16	0.59	23.76
Pb	mg/kg	80	2.67	2.78	1.78	0.96	0.02	-1.12	1.02	4.67	36.00
DTPA											
Fe	mg/kg	80	106.83	102.74	88.66	30.04	0.59	0.17	52.54	192.04	28.12
Mn	mg/kg	80	1.63	1.35	0.32	1.12	0.93	0.29	0.29	4.88	68.69
Cu	mg/kg	80	0.15	0.15	0.11	0.06	1.06	3.24	0.01	0.36	38.72
Zn	mg/kg	80	0.56	0.29	0.18	0.65	2.87	9.40	0.08	3.53	117.04
Cd	mg/kg	80	0.032	0.032	0.027	0.008	-0.014	0.160	0.007	0.051	26.19
Cr	mg/kg	80	0.031	0.013	0.013	0.044	2.863	8.530	0.006	0.229	142.24
Ni	mg/kg	80	0.15	0.15	0.15	0.05	1.01	1.40	0.06	0.32	31.04
Pb	mg/kg	80	2.33	2.23	2.08	0.67	0.86	0.40	1.36	4.34	28.59
RESINA											
Ca	mg/kg	80	553.86	561.12	440.88	162.63	0.22	0.01	160.32	981.96	29.36
P	mg/kg	80	19.65	18.00	14.00	7.88	0.99	0.80	7.00	45.00	40.10

Tabla 4.14. Resultados estadísticos de los elementos extraídos a profundidad >20cm (N=número de muestras; Media, Mediana, Moda, σ =desviación típica; Asimetría, Curtosis, Min=Mínimo, Max=Máximo, C.V= coeficiente de variación.

Macronutrientes

El Ca, al igual que en la profundidad anteriormente estudiada, es el macronutriente extraído en mayor cantidad con una valor medio de $677.48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, oscilando entre 180.52 y $1471.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ extraído mediante el reactivo Mehlich-3 y con unos valores de $553.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, como valor medio, oscilando entre 160.32 y $981.96 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción mediante resina. Para ambas extracciones el valor medio, así como los intervalos y son mayores en la profundidad de muestreo $>20\text{cm}$; esto puede explicarse por un elevado lavado de Ca lo que ha provocado que en esta profundidad haya mayor concentración.

El P presenta un contenido medio de $78.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción Mehlich-3 y un valor de $19.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción mediante resina. El rango en la extracción de Mehlich-3 oscila entre $24.16 - 155.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; y un rango de $7 - 45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción por resina. El P se comporta inversamente al Ca, las cantidades extraídas a profundidad $>20 \text{ cm}$ son sensiblemente menores a los muestreados a $0-20 \text{ cm}$, así como los intervalos también son menores.

Los coeficientes de variación de los macronutrientes P y Ca son altos, tanto para la extracción realizada con el reactivo Mehlich-3: Ca (35.88%) y P (36.97%), como para la extracción con resina: Ca (29.36%) y P (40.10%). Son valores similares a los obtenidos en la profundidad de muestreo $0-20 \text{ cm}$, si bien el Ca extraído por Mehlich-3 a profundidad $>20 \text{ cm}$ disminuye su CV en más de un 6% , aumentando en casi un 5% si la extracción es mediante resina. El P por su parte a mayor profundidad aumenta muy ligeramente su CV, menos de 3% en la extracción por Mehlich-3 y menos de un 2% en la extracción por resina.

Según los valores de asimetría y curtosis de los estos elementos, y atendiendo a la forma de los histogramas, Figura 4.8., tanto para la extracción con el reactivo Mehlich-3 como la extracción mediante resina asumimos la normalidad de los datos obtenidos para el Ca y el P.

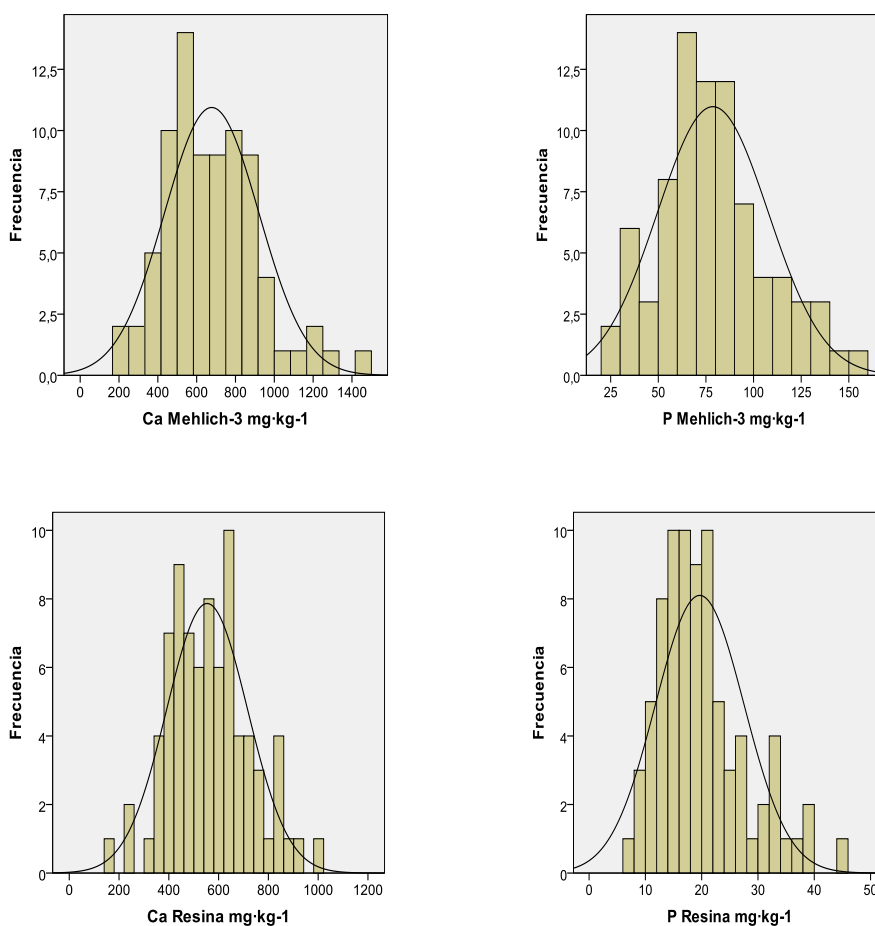


Figura 4.8.- Histogramas del contenido de Calcio y Fósforo, extraídos mediante Mehlich-3 y resina.

Las correlaciones lineales entre el Ca y el P están reflejadas en la Tabla 4.15.

Elemento	Ca (Mehlich)	P (Mehlich)	Ca (Resina)	P (Resina)
Ca (Mehlich)	1		0.80**	
P (Mehlich)		1		0.77**
Ca (Resina)			1	
P (Resina)				1

Tabla 4.15.- Matriz de correlación entre los macronutrientes extraídos con Mehlich-3 y resina (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

En la profundidad de muestreo >20 cm el Ca y el P no presentan correlación alguna entre ellos. El Ca extraído por Mehlich-3 tiene una correlación altamente significativa fuerte de sentido positivo ($r=0.80$) con el Ca extraído por resina; y por otro lado el P extraído por Mehlich-3 tiene una correlación altamente significativa moderada de sentido positivo ($r=0.77$) con el P extraído por resina.

Las correlaciones lineales entre los macronutrientes y las principales propiedades generales del suelo se muestran en la Tabla 4.16.

Elemento/Propiedad	pH	MO	CIC	Arena	Limo	Arcilla
Ca (Mehlich)	0.79**					
P (Mehlich)	-0.26*					
Ca (Resina)	0.65**					
P (Resina)	-0.26*					

Tabla 4.16.- Matriz de correlación entre los macronutrientes (extraídos con Mehlich-3 y resina) y las propiedades generales (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

Mientras que en la primera profundidad de muestreo (0-20 cm) aparecen otras correlaciones con la materia orgánica (MO), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la arcilla; podemos observar que los macronutrientes extraídos a una profundidad de muestreo de >20 cm, únicamente presentan correlaciones con el pH, bien hayan sido

extraídos por un método o por otro. El Ca es quien tiene correlaciones más fuertes con el pH, siendo ambas altamente significativas y moderadas de sentido positivo, con unos coeficientes de correlación $Ca_{\text{Mehlich-3}}$ $r=0.79$ y Ca_{resina} $r=0.65$. El Ca extraído por resina presenta una correlación similar al Ca extraído por resina en los 20 primeros cm de suelo ($r=0.67$); sin embargo el Ca extraído mediante Mehlich-3 presenta una correlación más fuerte que el obtenido en la profundidad 0-20 cm ($r=0.34$). El P se correlaciona con el pH de manera más débil y con menor significación y en sentido negativo, tanto en el $P_{\text{Mehlich-3}}$ ($r=-0.26$) como en el P_{resina} ($r=-0.26$). Las correlaciones de este elemento es muy similar a las obtenidas en la profundidad 0-20 cm.

Micronutrientes

En la Tabla 4.14 se muestra que el contenido en micronutrientes (Fe, Mn, Cu y Zn) determinado como en la profundidad anteriormente estudiada (0-20 cm) mediante las soluciones extractantes Mehlich-3 y DTPA. Las cantidades extraídas mediante Mehlich-3 fueron mayores que con la solución DTPA, como ocurría para el muestreo de suelo en los primeros 20 cm del mismo.

Es el Fe el elemento extraído en mayor cantidad ($366.96 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ con Mehlich-3 y $106.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ con DTPA), valores similares a los obtenidos en los primeros 20 cm de suelo para este elemento. Los valores de Cu obtenidos a la profundidad >20 cm son similares a los hallados en la profundidad de muestreo 0-20 cm. En este caso $0.31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ el $Cu_{\text{Mehlich-3}}$ y $0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ el Cu_{DTPA} . El Mn aparece en concentraciones mayores en esta profundidad respecto a los primeros 20 cm del suelo. Pasa de $0.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (0-20 cm) a $1.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en el $Mn_{\text{Mehlich-3}}$ y de $1.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (0-20 cm) a $1.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en el Mn_{DTPA} . El Zn también presenta valores más altos que en la profundidad 0-20 cm, si bien no destaca tanto como en el caso del Mn. El $Zn_{\text{Mehlich-3}}$ pasa de una concentración de $1.11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (0-20 cm) a $1.31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ mientras que el Zn_{DTPA} sube de $0.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (0-20 cm) a $0.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

En cuanto a los coeficientes de variación, el Fe y el Cu presentan los valores más bajos, 22.40% y 23.25% para la extracción con Mehlich-3 y 28.12% y 38.72% para DTPA respectivamente. El Zn tiene un CV de 64.32% extraído por Mehlich-3 y es el más alto en el caso de la extracción por DTPA con un CV de 117.04% (el mayor de todos los elementos estudiados después del Cr). Es el Mn quien presenta el coeficiente de variación más alto en la extracción con Mehlich-3, 80.37 %; mientras que en la extracción con DTPA tiene un CV de 68.69%; este elemento tiene unos CV muy similares a los de la profundidad 0-20 cm. El orden creciente de los coeficientes de variación sería el siguiente: extracción por Mehlich-3: Fe<Cu<Zn<Mn extracción por DTPA: Fe<Cu<Mn<Zn.

Atendiendo a los coeficientes de asimetría y curtosis, así como los histogramas obtenidos, Figura 4.9 y Figura 4.10; para los datos obtenidos por la extracción DTPA, no se puede asumir la normalidad de los datos los elementos Cu y Zn. Del mismo modo en la extracción con el reactivo Mehlich-3, no podemos asumir la normalidad de los datos en el caso de los elementos: Mn, Cu y Zn.

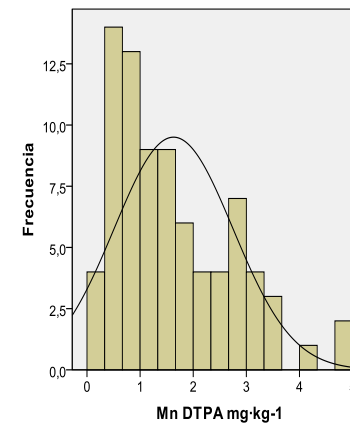
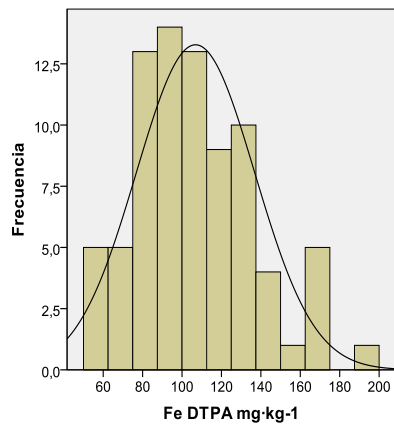
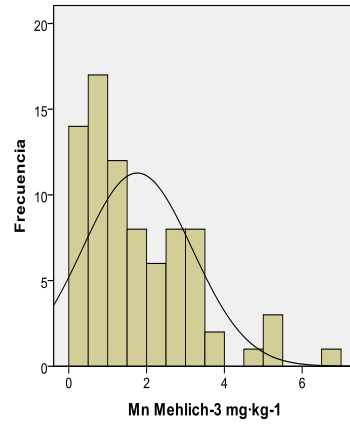
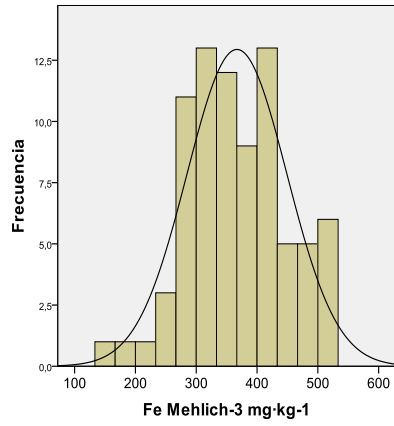


Figura 4.9.- Histogramas del contenido de Hierro y Manganeso, extraídos mediante Mehlich-3 y DTPA.

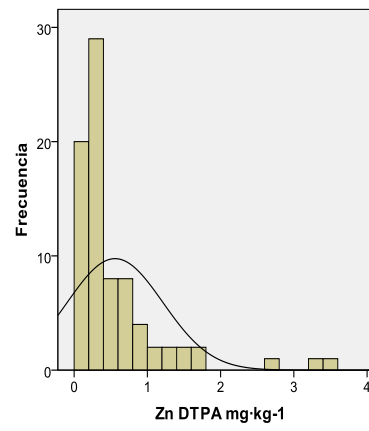
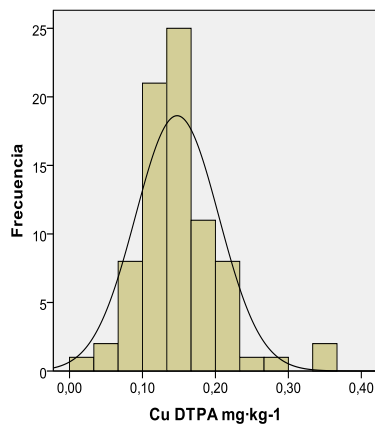
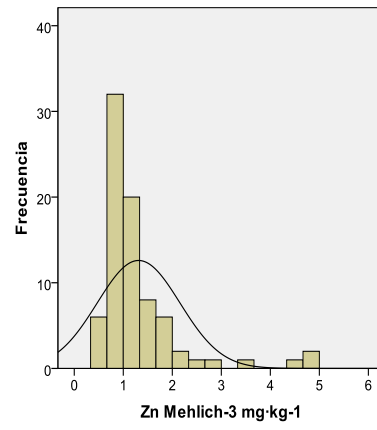
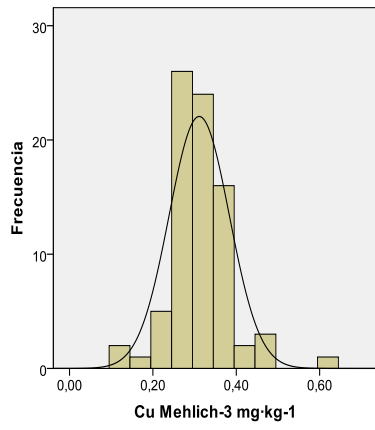


Figura 4.10.- *Histogramas del contenido de Cobre y Zinc, extraídos mediante Mehlich-3 y DTPA.*

Las correlaciones lineales entre los micronutrientes están reflejadas en la Tabla 4.17.

Mehlich-3				
Elemento	Fe	Mn	Cu	Zn
Fe	1	0.26*	-0.29**	
Mn		1		
Cu			1	0.23*
Zn				1
DTPA				
Elemento	Fe	Mn	Cu	Zn
Fe	1		0.25*	
Mn		1		0.24*
Cu			1	
Zn				1
Mehlich-3 - DTPA				
Elemento	Fe (DTPA)	Mn (DTPA)	Cu (DTPA)	Zn(DTPA)
Fe (Mehlich-3)	0.68**	0.31**		
Mn (Mehlich-3)		0.90**		
Cu (Mehlich-3)			0.31**	
Zn (Mehlich-3)				0.81**

Tabla 4.17.- Matriz de correlación entre los micronutrientes extraídos con Mehlich-3 y con DTPA (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

En la extracción con Mehlich-3 el Fe se correlaciona de forma altamente significativa y de sentido negativo con Cu, con un $r = -0.29$, y tiene una correlación únicamente significativa con el Mn, de sentido positivo y un coeficiente de correlación $r = 0.26$. El Cu además se correlaciona con el Zn, siendo esta correlación solamente significativa, de sentido positivo y débil ($r = 0.23$). En cuanto a la extracción con DTPA, únicamente aparecen dos correlaciones y no de alta significación; entre el Fe y el Cu de sentido positivo y un coeficiente de correlación $r = 0.25$; y otra entre el Mn y el Zn, también débil y de sentido positivo ($r = 0.24$). Comparando estas correlaciones con las obtenidas de los datos de profundidad 0 a 20 cm, observamos que en esta profundidad (> 20 cm) hay un mayor número de correlaciones (5 frente a 3) pero de coeficientes de correlación menores y únicamente una de ellas de alta significación. En cuanto a las correlaciones entre elementos

extraídos mediante Mehlich-3 y los extraídos por DTPA, cada elemento se correlaciona únicamente con si mismo extraído mediante el otro método (salvo en el caso del Fe), siendo la correlación siempre positiva y de alta significación. El $Fe_{Mehlich-3}$ y el Fe_{DTPA} tienen un coeficiente de correlación $r=0.68$, y por otro lado el $Fe_{Mehlich-3}$ y el Mn_{DTPA} presentan un coeficiente $r=0.31$. El $Cu_{Mehlich-3}$ y el Cu_{DTPA} tienen un coeficiente de correlación $r=0.31$. El $Mn_{Mehlich-3}$ y el Mn_{DTPA} se muestran un coeficiente de correlación $r=0.90$, siendo la más fuerte de todas las correlaciones entre los micronutrientes. Y por último, el coeficiente de correlación entre el $Zn_{Mehlich-3}$ y el Zn_{DTPA} es $r=0.81$.

Las correlaciones lineales entre los micronutrientes y los macronutrientes están reflejadas en la Tablas 4.18.

	Mehlich-3		Resina	
Mehlich-3	Ca	P	Ca	P
Fe				
Mn	0.60**		0.58**	
Cu		0.29**		
Zn	0.25*			
	Mehlich-3		Resina	
DTPA	Ca	P	Ca	P
Fe				0.39**
Mn	0.47**		0.50**	
Cu		0.26*		
Zn	0.24*			

Tabla 4.18.- Matriz de correlación entre los micronutrientes y macronutrientes extraídos con Mehlich-3, resina y con DTPA (* nivel de significación para $p<0.05$; ** nivel de significación para $p<0.01$).

Observando las correlaciones lineales entre los micronutrientes y los macronutrientes, vemos que el Fe, en la extracción por Mehlich-3 no tiene ninguna correlación significativa con Ca y P, al igual que ocurría en el estudio a la profundidad 0-20 cm; en la extracción de DTPA sin embargo y a diferencia de lo que ocurría en la profundidad 0-20 cm, aparece una correlación de alta significación y sentido positivo del Fe

con el P_{Resina} , con un $r=0.39$. El Mn extraído mediante Mehlich-3 y DTPA presenta correlaciones con el Ca, (tanto el obtenido con Mehlich-3 como el obtenido por resina); siendo estas cuatro correlaciones altamente significativas y positivas, con coeficientes de correlación moderados comprendidos entre 0.49 - 0.60. Es el Mn el elemento que presenta un mayor número de correlaciones con los macronutrientes; para esta profundidad (>20 cm) el Mn tiene una mayor correlación con el Ca que en el estudio para 0-20 cm, donde los coeficientes de correlación eran menores (y en algún caso de menor significación). El Cu extraído mediante Mehlich-3 presenta unos coeficientes de correlación positivos $r=0.29$ (para un $p<0.01$) con el P (extraído mediante Mehlich-3) y de $r=0.26$ (para un $p<0.05$) con el P extraído mediante resina. En el caso del Cu, en la profundidad de >20 cm tiene un menor número de correlaciones que las que presentaba para la profundidad 0-20 cm (2 frente a 6). El Zn únicamente presenta correlaciones significativas con el $Ca_{\text{Mehlich-3}}$. El $Zn_{\text{Mehlich-3}}$ tiene una correlación débil ($r=0.25$) (para un $p<0.05$) mientras que el Zn_{DTPA} también presenta una relación lineal débil ($r=0.24$) (para un $p<0.05$) con el $Ca_{\text{Mehlich-3}}$. El Zn era el elemento que presentaba correlaciones más fuertes para la profundidad 0-20 cm; sin embargo en esta segunda profundidad estudiada (>20 cm) únicamente presenta estas dos correlaciones, ya citadas, y no de alta significación.

Las correlaciones lineales entre los micronutrientes y las propiedades generales se muestran en las Tabla 4.19.

Elemento/Propiedad	pH	MO	CIC	Arena	Limo	Arcilla
Fe(Mehlich-3)		0.35**		0.25*	-0.25*	
Mn (Mehlich-3)	0.62**					
Cu(Mehlich-3)			0.27*			
Zn(Mehlich-3)						
Fe(DTPA)			-0.22*			
Mn(DTPA)	0.48**		-0.34**			
Cu(DTPA)						
Zn(DTPA)						

Tabla 4.19.- Matriz de correlación entre los micronutrientes (extraídos con Mehlich-3 y con DTPA) y las propiedades generales (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

A la profundidad >20 cm aparecen más correlaciones lineales entre los micronutrientes y las propiedades generales (8 frente a 4). El caso del Fe es especialmente significativo dado que mientras en los 20 primeros cm de suelo no presentaba correlación con las propiedades generales, los 20 siguientes cm presenta cuatro correlaciones. El $Fe_{\text{Mehlich-3}}$ tiene una correlación de alta significación y sentido positivo con la MO, con un coeficiente de correlación $r=0.35$. Además muestra otras dos correlaciones únicamente significativas con la arena (de signo positivo y $r=0.25$) y con el limo ($r=-0.25$). El Fe_{DTPA} tiene una correlación negativa únicamente significativa y débil ($r=-0.22$) con la capacidad de intercambio catiónico (CIC). El $Mn_{\text{Mehlich-3}}$ tiene una correlación lineal altamente significativa y de sentido positivo, moderada, $r=0.62$ con el pH, y el Mn_{DTPA} se correlaciona positivamente con el pH (para $p < 0.01$) y con un coeficiente de correlación $r=0.48$, además el Mn_{DTPA} se correlaciona negativamente y con alta significación la capacidad de intercambio catiónico (CIC), con un $r=-0.34$ en este caso. El Mn tiene correlaciones similares a las obtenidas en la profundidad 0-20 cm con el pH, si bien en la profundidad >20 cm son más fuertes y en el caso del Mn_{DTPA} más significativa. La correlación Mn_{DTPA} -CIC no aparecía en la profundidad 0-20 cm. Por último el Cu extraído por Mehlich-3 tiene una correlación de signo positivo, solamente significativa y débil ($r=0.27$) con la capacidad

de intercambio catiónico (CIC). El Cu se comporta de manera diferente a esta profundidad; el Cu (0-20 cm) tiene correlación con la arena y la arcilla y no con la CIC.

Metales pesados

Se han estudiado, al igual que para la profundidad de suelo 0-20 cm, los siguientes metales pesados: Cd, Cr, Ni y Pb. Realizándose también su determinación utilizando los reactivos, Mehlich-3 y DTPA. Las cantidades extraídas están reflejadas en la Tabla 4.14. Las concentraciones de metales pesados determinados por cualquiera de los dos métodos quedan por debajo de los valores considerados como tóxicos.

Las concentraciones de Cd varían en gran medida en función del método de extracción. El $Cd_{Mehlich-3}$ tiene una concentración media de $0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en un rango entre $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y $0.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. El Cd_{DTPA} por otro lado tiene una concentración media de $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ siendo el intervalo entre $0.007 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y $0.051 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Las concentraciones obtenidas con el extractor Mehlich-3 para esta profundidad ($>20 \text{ cm}$) son similares a las concentraciones obtenidas para la profundidad 0-20 cm. El Cr en la extracción por Mehlich-3 presenta una concentración media de $0.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (siendo considerablemente superior al Cr de la profundidad 0-20 cm); las concentraciones oscilan entre un mínimo de $0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y un máximo de $0.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En el caso de la extracción por DTPA la concentración media es $0.031 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (ligeramente inferior al Cr obtenido de 0-20 cm), si bien, el rango es amplísimo, entre $0.006 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y $0.229 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Esto mismo sucedía para las concentraciones de Cr de la profundidad 0-20 cm.

El Ni en la extracción mediante Mehlich-3 presenta unas cantidades considerablemente superiores a las obtenidas por DTPA; $Ni_{Mehlich-3}$ $0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ frente a $0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ del Ni_{DTPA} . El intervalo para el $Ni_{Mehlich-3}$ es de $0.16-0.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y para el Ni_{DTPA} $0.06-0.032 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Este elemento es el que se comporta de forma más similar a ambas profundidades.

El Pb es el metal pesado extraído en una mayor cantidad, con una concentración media de $2.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción con Mehlich-3 y de $2.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción mediante DTPA. Las concentraciones de este elemento si son similares a las encontradas en la profundidad 0-20 cm, si bien inferior en el caso del $\text{Pb}_{\text{Mehlich-3}}$ y prácticamente igual en el Pb_{DTPA} .

El Cd presenta unos coeficientes de variación similares para las dos extracciones, 21% para el Mehlich-3 y 26.17% para DTPA. El Cr presenta valores más dispares comparando las dos extracciones; un coeficiente de variación de 25.36% para Mehlich-3, mientras que en la extracción por DTPA presenta un coeficiente de variación de 142.24%, siendo este el más alto de todos los elementos químicos estudiados; se comporta por lo tanto de igual forma que en la profundidad de muestreo 0-20 cm. El Ni es elemento que tiene coeficientes de variación de 23.76% en el caso del Ni extraído mediante Mehlich-3 y de 31.04% en el extraído por DTPA. Se comporta de manera similar a como lo hacía el Ni extraído a 0-20 cm de suelo. El Pb tiene unos coeficientes de variación superiores de 36% para Pb obtenido por Mehlich-3 y de 28.56% para la extracción por DTPA; en este caso el coeficiente de variación de la extracción por Mehlich-3 aumenta considerablemente (de 25.85% a 36%) y por el contrario disminuye de manera notable (de 37.23% a 28.59) en el Pb extraído mediante DTPA. El orden creciente de los coeficientes de variación sería el siguiente: Extracción por Mehlich-3: $\text{Cd}<\text{Ni}<\text{Cr}<\text{Pb}$, extracción por DTPA: $\text{Cd}<\text{Ni}<\text{Pb}<\text{Cr}$.

Atendiendo a los histogramas (Figuras 4.11 y 4.12), coeficientes de asimetría, curtosis y los histogramas de distribución de frecuencia, en la extracción por Mehlich-3 de los metales pesados; se puede asumir la normalidad de los datos de todos los elementos estudiados con la salvedad del Ni y el Cr. En la extracción mediante DTPA tampoco los datos de Cr y el Ni presentan una distribución normal.

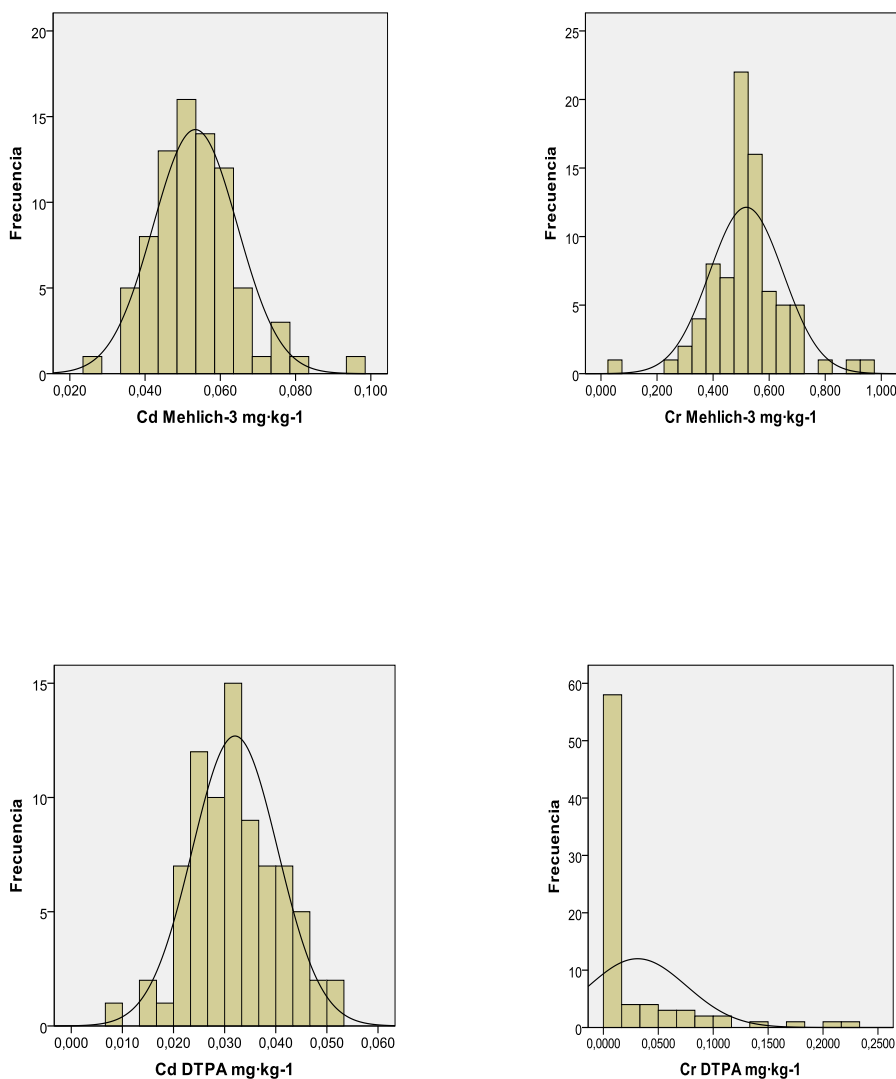


Figura 4.11.- Histogramas del contenido de Cadmio y Cromo, extraídos mediante Mehlich-3 y DTPA.

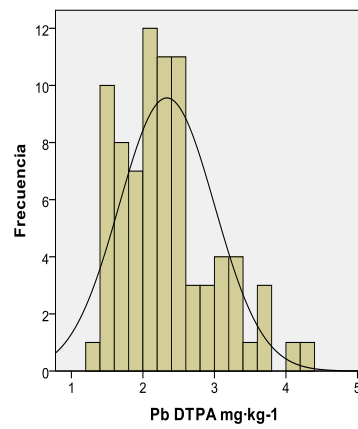
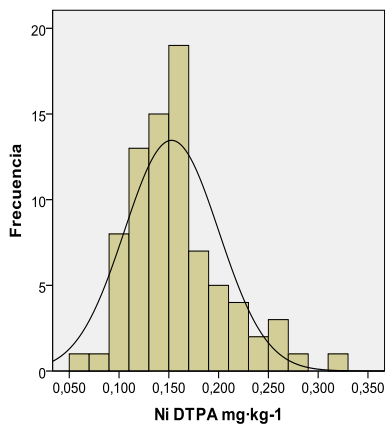
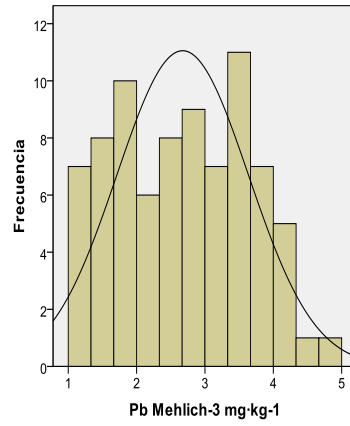
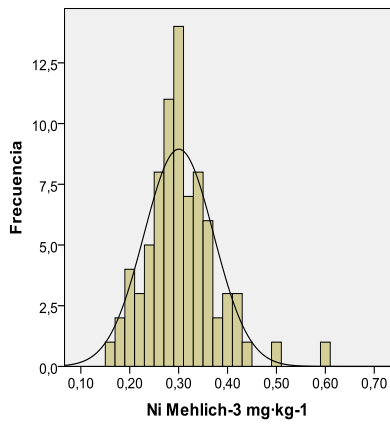


Figura 4.12.- Histogramas del contenido de Níquel y Plomo, extraídos mediante Mehlich-3 y DTPA.

La matriz de correlaciones entre los metales pesados se muestra en la Tabla 4.20.

Mehlich-3				
Elemento	Cd	Cr	Ni	Pb
Cd	1	-0.30**		
Cr		1		
Ni			1	0.52**
Pb				1
DTPA				
Elemento	Cd	Cr	Ni	Pb
Cd	1		0.59**	0.43**
Cr		1	0.25*	
Ni			1	0.57**
Pb				1
Mehlich-3 - DTPA				
Elemento	Cd (DTPA)	Cr (DTPA)	Ni (DTPA)	Pb(DTPA)
Cd (Mehlich-3)	0.59**		0.45**	0.31**
Cr (Mehlich-3)		-0.35**	-0.23*	
Ni (Mehlich-3)	0.32**	0.61**		0.28*
Pb (Mehlich-3)	0.29**	-0.23*	0.40**	0.54**

Tabla 4.20.- Matriz de correlación entre los metales pesados extraídos con Mehlich-3 y con DTPA (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

Las correlaciones entre los metales pesados a la profundidad >20 cm muestran grandes diferencias con las obtenidas a 0-20 cm. Especialmente llamativo en el caso del Pb que sólo tenía una correlación lineal en la primera profundidad estudiada, y a >20 cm presenta nueve.

En el caso de la extracción mediante Mehlich-3 de los elementos, aparecen únicamente dos correlaciones: entre el Cd y el Cr, de alta significación, sentido negativo (a 0-20 cm era en sentido positivo) y débil ($r=0.30$); y entre el Ni y el Pb, de alta significación, sentido positivo y moderada ($r=0.52$). En el caso de la extracción de elementos por DTPA, las correlaciones son cuatro. El Cd se correlaciona de forma altamente significativa, sentido

positivo y moderadamente con el Ni y el Pb ($r=0.59$ y 0.43 respectivamente). El Cr tiene una correlación lineal únicamente significativa y débil con el Ni de sentido positivo ($r=0.25$). Y el Ni y el Pb se correlacionan con alta significación, sentido positivo y con un coeficiente de correlación moderado; $r=0.57$. Las relaciones lineales entre los elementos extraídos por Mehlich-3 y los extraídos por DTPA son las más numerosas. El $Cd_{Mehlich-3}$ se correlaciona de manera altamente significativa y sentido positivo con el Cd_{DTPA} , el Ni_{DTPA} y el Pb_{DTPA} , con unos coeficientes de correlación: $r=0.59$, $r=0.45$ y $r=0.31$ respectivamente. El $Cr_{Mehlich-3}$ tiene una correlación lineal altamente significativa y de sentido negativo con el Cr_{DTPA} con un $r=-0.35$; y una correlación solo significativa con el Ni, de sentido negativo débil ($r=-0.23$). El $Ni_{Mehlich-3}$ presenta dos correlaciones lineales altamente significativas y de sentido positivo con el Cd_{DTPA} y el Cr_{DTPA} , con unos coeficientes de correlación $r=0.32$ y $r=0.61$. Además el $Ni_{Mehlich-3}$ tiene una correlación únicamente significativa, de sentido positivo y débil ($r=0.28$) con el Pb_{DTPA} . El $Pb_{Mehlich-3}$ tiene correlaciones con los cuatro elementos extraídos por DTPA. Con el Cd_{DTPA} , el Ni_{DTPA} y el Pb_{DTPA} de forma altamente significativa y sentido positivo; con unos coeficientes de correlación: $r=0.29$, $r=0.40$ y $r=0.54$ respectivamente. El $Pb_{Mehlich-3}$ y el Cr_{DTPA} tienen una relación lineal solamente significativa, de sentido negativo y débil ($r=-0.23$).

La matriz de correlaciones entre los metales pesados y los macronutrientes se muestra en la Tabla 4.21.

	Mehlich-3		Resina	
Mehlich-3	Ca	P	Ca	P
Cd		0.61**	0.28*	0.68**
Cr				-0.28*
Ni		0.35**		0.27*
Pb		0.52**	-0.24*	
	Mehlich-3		Resina	
DTPA	Ca	P	Ca	P
Cd		0.55**		0.51**
Cr				0.28*
Ni		0.47**		0.44**
Pb		0.46**		0.30**

Tabla 4.21.- Matriz de correlación entre los metales pesados y los macronutrientes extraídos con Mehlich-3 y con DTPA (* nivel de significación para $p<0.05$; ** nivel de significación para $p<0.01$).

En el caso de las correlaciones con los macronutrientes estudiados, las diferencias respecto a las correlaciones obtenidas en los primeros 20 cm de suelo son considerables. En este caso, ninguno de los elementos se correlaciona con el Ca extraído por Mehlich-3; y existen más relaciones lineales de los metales pesados con el P (ya sea extraído por un método u otro). Además en este caso todos los metales pesados presentan al menos una correlación mientras que en la profundidad 0-20 cm únicamente el Cd y el Ni las tienen.

El $Cd_{Mehlich-3}$ tiene dos correlaciones de alta significación y sentido positivo con el $P_{Mehlich-3}$ y el P_{resina} , con coeficientes de correlación moderados ($r=0.61$ y $r=0.68$, respectivamente). Por otro lado el $Cd_{Mehlich-3}$ tiene una correlación lineal únicamente significativa de sentido positivo y débil ($r=0.28$) con el Ca extraído por resina. El Cd_{DTPA} también se correlaciona con alta significación y sentido positivo con los $P_{Mehlich-3}$ y P_{resina} .

($r=0.55$ y $r=0.51$, respectivamente). El $Cr_{Mehlich-3}$ tiene una correlación solamente significativa con el P_{resina} de sentido negativo y débil ($r=-0.28$) y el Cr_{DTPA} tiene una correlación únicamente significativa con el P_{resina} de sentido positivo y débil ($r=0.28$). El $Ni_{Mehlich-3}$, por su parte, muestra una correlación con alta significación y sentido positivo con el $P_{Mehlich-3}$ con un coeficiente de correlación $r=0.35$; y correlación únicamente significativa de sentido positivo y débil ($r=0.28$) con el P extraído por resina. El Ni_{DTPA} tiene dos correlaciones altamente significativas, de sentido positivo y moderadas con el $P_{Mehlich-3}$ y el P_{resina} ($r=0.47$ y $r=0.44$, respectivamente). El Pb_{DTPA} muestra al igual que el Ni_{DTPA} , dos correlaciones altamente significativas, de sentido positivo y con los $P_{Mehlich-3}$ y P_{resina} con coeficientes de correlación: $r=0.46$ y $r=0.30$. El $Pb_{Mehlich-3}$ presenta una correlación altamente significativa de sentido positivo y moderada ($r=0.54$) con el $P_{Mehlich-3}$ y una correlación solamente significativa negativa y débil ($r=-0.24$) con el Ca extraído por resina.

La matriz de correlaciones entre los metales pesados y los micronutrientes se muestra en la Tabla 4.22.

	Mehlich-3				DTPA			
Mehlich-3	Fe	Mn	Cu	Zn	Fe	Mn	Cu	Zn
Cd					0.30**		0.26*	
Cr					-0.22*			
Ni			0.57**					
Pb	-0.56**	-0.26*	0.44**	0.28*				
	Mehlich-3				DTPA			
DTPA	Fe	Mn	Cu	Zn	Fe	Mn	Cu	Zn
Cd					0.45**		0.39**	
Cr	0.28*				0.60**			
Ni					0.45**		0.23*	
Pb							0.29**	

Tabla 4.22. Matriz de correlación entre los metales pesados y los micronutrientes extraídos con Mehlich-3 y con DTPA (* nivel de significación para $p<0.05$; ** nivel de significación para $p<0.01$).

A diferencia de la profundidad 0-20 cm donde el Pb es el único elemento que no presenta correlación significativa con alguno de los micronutrientes; en la profundidad >20 cm gana protagonismo, y el Pb extraído por Mehlich-3 se correlaciona con todos los micronutrientes obtenidos con el mismo extractante. También destacan la no existencia de correlaciones del Zn, mientras que en la primera profundidad estudiada aparecían cuatro.

Las correlaciones más fuertes y significativas son las del $Ni_{Mehlich-3}$ con el $Cu_{Mehlich-3}$, siendo esta correlación de sentido positivo y un coeficiente de correlación $r=0.57$; la del $Pb_{Mehlich-3}$ con el $Fe_{Mehlich-3}$, de carácter negativo en este caso y un coeficiente de correlación $r=0.56$ y la del Cr_{DTPA} con el Fe_{DTPA} de sentido positivo; siendo esta la más fuerte de todas las correlaciones con un $r=0.60$.

La matriz de correlaciones entre los metales pesados y las propiedades generales se muestra en la Tabla 4.23.

Elemento/Propiedad	pH	MO	CIC	Arena	Limo	Arcilla
Cd(Mehlich-3)			0.24*			
Cr(Mehlich-3)	0.23*	0.27*				
Ni(Mehlich-3)	-0.31**					
Pb(Mehlich-3)	-0.31**			-0.22*		
Cd (DTPA)						
Cr(DTPA)						
Ni(DTPA)	-0.54**			-0.23*		0.25*
Pb(DTPA)	-0.33**					

Tabla 4.23. Matriz de correlación entre los metales pesados (extraídos con Mehlich-3 y con DTPA) y las propiedades generales (* nivel de significación para $p<0.05$; ** nivel de significación para $p<0.01$).

En el caso de la profundidad de muestreo >20 cm las relaciones entre los metales pesados y las propiedades generales del suelo son mucho menos numerosas, más débiles y menos significativas como norma general. Es llamativo, la casi inexistente relaciones con la

materia orgánica (MO) así como con las fracciones granulométricas; siendo en los primeros 20 cm de suelo numerosas y en los 20 cm siguientes casi testimoniales.

Las únicas correlaciones lineales altamente significativas son con el pH. El $Ni_{Mehlich-3}$ y el Ni_{DTPA} presentan unos coeficientes de correlación $r=-0.31$ y $r=-0.54$ respectivamente; mientras los coeficientes de correlación para $Pb_{Mehlich-3}$ y el Pb_{DTPA} son similares, $r=-0.31$ y $r=-0.33$.

Análisis de componentes principales (Mehlich-3)

	CP1	CP2	CP3
Autovalores	2.446	1.509	1.269
Proporción Varianza	0.306	0.189	0.159
Varianza acumulada	0.306	0.494	0.653
Variables del CP			
Cd	0.034	0.758**	0.240*
Cr	0.101	-0.724**	0.183
Ni	0.714**	0.346**	0.133
Pb	0.860**	-0.051	-0.111
Cu	0.740**	0.210	0.304**
Fe	-0.674**	0.346**	0.344**
Mn	-0.273*	-0.115	0.771**
Zn	0.328**	-0.333**	0.585**
Correlaciones CPsQuímica, altura, CPs Pgenerales y CPsTopografía			
Altura	-	-0.290**	0.304**
CPG1	-0.355**	-	0.526**
CPG2	-	-	-
CPG3	-	0.266*	-
CPG4	-	-	-
CPG5	-	-	0.318**
CPT1	-	-	0.291**
CPT2	-	-	-

Tabla 4.24. Componentes Principales de los elementos extraídos con Mehlich-3 a profundidad >20cm. (* nivel de significación para $p<0.05$; ** nivel de significación para $p<0.01$).

En la Tabla 4.24 se muestra es análisis de componentes principales realizado de las propiedades químicas extraídas mediante Mehlich-3 de la zona de estudio. Se observa que el 65% de la variabilidad de los datos quedan explicados mediante tres componentes principales (CP) con autovalores superiores a 1.

El primer componente, **CP₁**, explica el 30% de la variabilidad, el orden decreciente de los pesos de los elementos en el componente es: Pb>Cu>Ni>Fe>Zn>Mn. Intervienen por lo tanto en el componente 6 de los 8 elementos extraídos. El Pb, el Cu el Ni y el Zn

participan en el componente son signo positivo y por otro lado Fe y Mn lo hacen con signo negativo, con tendencia a disminuir cuando aumentan el resto. El **CP₂** explica un 18.8% adicional de la variabilidad, siendo en este caso el orden creciente de los pesos de elementos que participan en el componente: Cd>Cr>Ni>Fe>Zn. Cd, Ni y Fe se asocian con signo positivo mientras que Cr y Zn lo hacen con signo negativo. El tercer componente, **CP₃** explica un 15.9% más de la variabilidad, siendo en este caso el orden decreciente de los pesos en el componente: Mn>Zn>Fe>Cu>Cd; todos ellos se asocian con signo positivo en el componente. A esta profundidad también aparecen 3 componentes principales como ocurría en el intervalo 0-20 cm, si bien la composición de los mismos es notablemente distinta.

El CP₁ presenta una correlación altamente significativa con el componente principal CPG₁ de las propiedades generales (donde pH, Ca, Al, SB, y V son los elementos destacados, con un $r=-0.35$). El CP₂ se correlaciona con forma altamente significativa con la altura ($r=-0.29$) y el componente CPG₃ de las propiedades generales (en el cual destacan las la CIC y la acidez de cambio (H+Al)), $r=0.26$. El CP₃ muestra correlaciones altamente significativas con la altura ($r=0.30$), con el componente principal CPG₁ de las propiedades generales ($r=0.52$); con el componente principal CPG₅ de las propiedades generales (donde el K y la MO son los elementos destacados del componente, $r=0.32$) y con el componente principal CPT₁ de la topografía ($r=0.29$).

Análisis de componentes principales (DTPA)

	CP1	CP2	CP3
Autovalores	2.674	1.492	1.235
Proporción Varianza	33.424	18.648	15.439
Varianza acumulada	33.424	52.072	67.511
Variables del CP			
Cd	0.789**	0.229*	-0.100
Cr	0.367*	-0.726**	0.430**
Ni	0.814**	-0.145	-0.293**
Pb	0.648**	0.246*	-0.458**
Cu	0.531**	0.340**	0.029
Fe	0.732**	-0.322**	0.472**
Mn	0.109	0.508**	0.589**
Zn	0.075	0.595**	0.417**
Correlaciones CPsQuímica, altura, CPsPgenerales y CPsTopografía			
Altura	-	-	-
CPG1	-	0.321**	0.487**
CPG2	-	-	-
CPG3	-	-	-
CPG4	-	-	-
CPG5	-	-	-
CPT1	-	-	-
CPT2	-	-	-

Tabla 4.25. Componentes Principales de los elementos extraídos con DTPA a profundidad >20cm. (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

En la Tabla 4.25 se muestra es análisis de componentes principales realizado de las propiedades químicas extraídas mediante DTPA de la zona de estudio. Se observa que el 67% de la variabilidad de los datos quedan explicados mediante tres componentes principales (CP) con autovalores superiores a 1.

El primer componente, **CP₁**, explica el 33% de la variabilidad, siendo el orden decreciente de los pesos de los elementos en el componente: Ni>Cd>Fe>Pb>Cu>Cr. Todos los elementos se asocian con signo positivo en el componente. El **CP₂** explica un 18.6% adicional de la variabilidad, contribuyendo al componente todos los elementos salvo

el Ni, el orden decreciente de los pesos es: Cr>Zn>Mn>Cu>Fe>Pb>Cd. El Cr y el Fe se asocian con signo negativo frente al resto de componentes de forma que tienen tendencia a disminuir cuando el resto de elementos (que participan en el componente) aumentan. El tercer componente, **CP₃**, explica un 15.4% más de la variabilidad, y en este caso el orden decreciente de los pesos es: Mn>Fe>Pb>Cr>Zn>Ni. Ni y Pb (que se asocian con signo negativo en el componente) tienden a decrecer cuando aumentan los demás elementos.

El segundo componente (CP₂) presenta una correlación altamente significativa con el componente principal CPG₁ de las propiedades generales (donde pH, Ca, Al, SB, y V son los elementos destacados, $r=0.32$). El CP₃ muestra una correlación altamente significativa con el componente principal CPG₁ de las propiedades generales ($r=0.48$).

4.4.3 Horizonte A

En la Tabla 4.26 se muestra la estadística correspondiente a las 80 muestras de los elementos estudiados, tanto los extraídos mediante el reactivo Mehlich-3 como el DTPA. También se incluyen los macronutrientes Ca y P, que fueron extraídos mediante resina.

Prop	Unidades	N	Media	Mediana	Moda	σ	Asimetría	Curtosis	Min	Max	C.V.
MEHLICH-3											
Ca	mg/kg	80	531.10	497.15	156.23	182.58	0.62	0.25	156.23	1037.62	34.38
P	mg/kg	80	111.29	108.80	40.17	35.24	0.30	0.06	40.17	203.11	31.66
K	mg/kg	80	58.70	55.42	32.52	17.02	1.40	3.04	32.52	118.56	29.00
Fe	mg/kg	80	354.53	349.38	189.55	55.03	-0.11	0.15	189.55	471.84	15.52
Mn	mg/kg	80	1.29	0.95	0.25	0.97	1.18	0.99	0.25	4.55	74.97
Cu	mg/kg	80	0.33	0.32	0.29	0.06	2.48	12.68	0.24	0.66	17.63
Zn	mg/kg	80	1.18	1.08	0.77	0.42	1.69	3.67	0.54	2.89	35.41
Cd	mg/kg	80	0.05	0.05	0.05	0.01	0.33	-0.49	0.03	0.08	19.25
Cr	mg/kg	80	0.41	0.41	0.40	0.07	0.34	2.08	0.21	0.66	17.06
Ni	mg/kg	80	0.30	0.29	0.26	0.05	0.80	1.22	0.17	0.45	16.52
Pb	mg/kg	80	3.17	3.16	2.32	0.82	0.30	-0.76	1.70	5.22	25.87
DTPA											
Fe	mg/kg	80	107.01	104.47	59.28	24.57	0.83	1.15	59.28	196.50	22.96
Mn	mg/kg	80	1.29	0.99	0.49	0.86	0.86	-0.34	0.27	3.76	66.39
Cu	mg/kg	80	0.13	0.13	0.12	0.04	0.92	1.19	0.07	0.27	30.95
Zn	mg/kg	80	0.46	0.34	0.24	0.32	2.26	6.28	0.14	1.94	68.82
Cd	mg/kg	80	0.04	0.04	0.04	0.01	0.52	-0.07	0.02	0.06	20.65
Cr	mg/kg	80	0.03	0.01	0.01	0.04	2.29	6.76	0.01	0.21	107.73
Ni	mg/kg	80	0.16	0.15	0.15	0.04	0.43	-0.34	0.09	0.24	22.37
Pb	mg/kg	80	2.28	2.14	2.18	0.72	3.08	15.02	1.49	6.51	31.43
RESINA											
Ca	mg/kg	80	501.53	496.08	360.72	121.11	0.21	0.11	169.54	761.52	24.15
P	mg/kg	80	31.77	29.94	33.38	10.54	0.47	-0.09	12.44	61.03	33.18

Tabla 4.26. Resultados estadísticos de los elementos extraídos en el Horizonte A (N=número de muestras; Media, Mediana, Moda, σ =desviación típica; Asimetría, Curtosis, Min=Mínimo, Max=Máximo, C.V= coeficiente de variación).

Macronutrientes

La tabla nos indica que el Ca es el macronutriente extraído en mayor cantidad con una valor medio de $531.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, con un valor mínimo de $156.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y un valor máximo de $1037.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (extraído mediante el reactivo Mehlich-3) y con uno valor medio de $501.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, siendo el intervalo $169.54 - 761.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción mediante resina. El P presenta un contenido medio de $111.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción Mehlich-3 y un valor considerablemente menor $31.77 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción por resina.

El rango en la extracción de Mehlich-3 oscila entre 40.17 y 203.11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; y un rango de 12.44 - 61.03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción por resina.

Los coeficientes de variación de los macronutrientes P y Ca son altos, tanto para la extracción realizada con el reactivo Mehlich-3: Ca (34.38%) y P (31.66%), como para la extracción con Resina: Ca (24.15%) y P (33.18%) son medio-altos.

Según los valores de asimetría y curtosis de los estos elementos y atendiendo a la forma de los histogramas (Figura 4.13) tanto para la extracción con el reactivo Mehlich-3 como la extracción mediante resina podemos asumir la normalidad de los datos obtenidos para el Ca y el P.

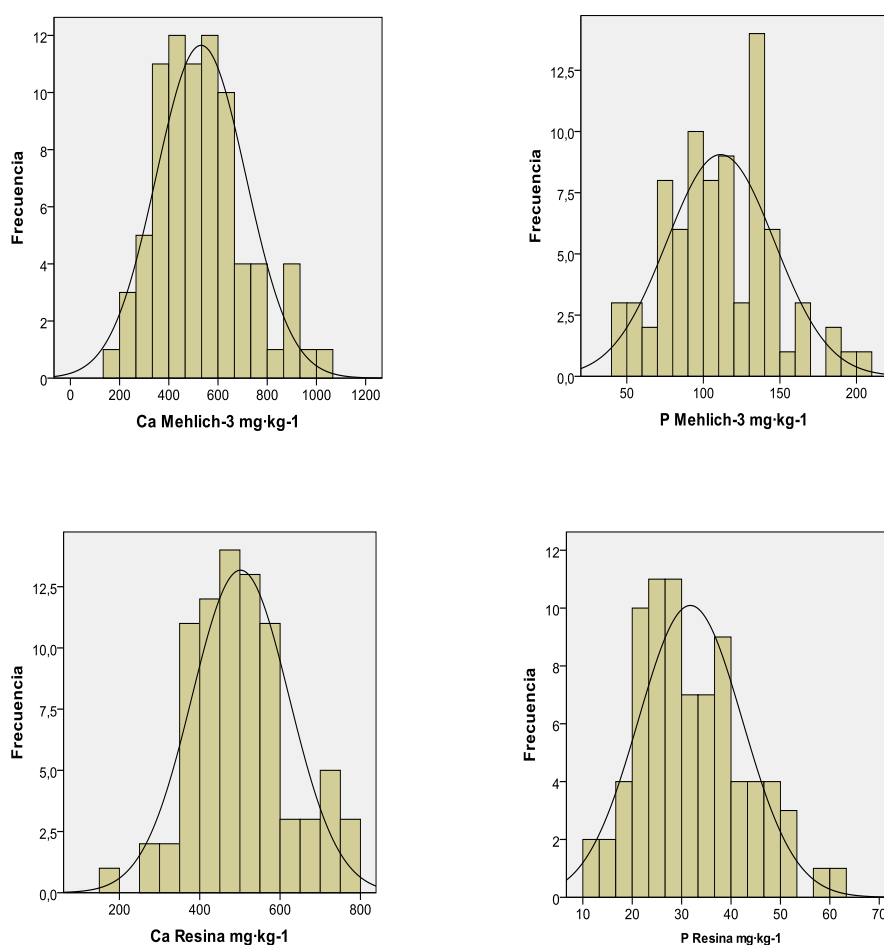


Figura 4.13.- Histogramas del contenido de Calcio y Fósforo, extraídos mediante Mehlich-3 y resina.

Las correlaciones lineales entre el Ca y el P están reflejadas en la Tabla 4.27.

Elemento	Ca (Mehlich)	P (Mehlich)	Ca (Resina)	P (Resina)
Ca (Mehlich)	1		0.91**	
P (Mehlich)		1		0.86**
Ca (Resina)			1	
P (Resina)				1

Tabla 4.27.- Matriz de correlación entre los macronutrientes extraídos con Mehlich-3 y resina (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

El Ca y el P no presentan correlación alguna entre ellos. El Ca extraído por Mehlich-3 tiene una correlación altamente significativa muy fuerte de sentido positivo ($r=0.91$) con el Ca extraído por resina; y por otro lado el P extraído por Mehlich-3 tiene una correlación altamente significativa fuerte de sentido positivo ($r=0.86$) con el P extraído por resina.

Las correlaciones lineales entre los macronutrientes y las principales propiedades generales del suelo se muestran en la Tabla 4.28. En este caso no se han tenido en cuenta las fracciones granulométricas y se han incluido las medidas de conductividad eléctrica aparente, tanto en el dipolo vertical como en el horizontal.

Elemento/Propiedad	pH	MO	CIC	CE _a -H	CE _a -V
Ca (Mehlich)	0.68**				
P (Mehlich)	-0.25*	-0.32**		0.47**	
Ca (Resina)	0.64**			0.30**	0.24*
P (Resina)	-0.24*			0.30**	

Tabla 4.28.- Matriz de correlación entre los macronutrientes (extraídos con Mehlich-3 y resina) y las propiedades generales (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

El Ca tiene correlaciones fuertes con el pH, siendo ambas altamente significativas y moderadas de sentido positivo, con unos coeficientes de correlación $Ca_{\text{Mehlich-3}}$ $r=0.68$ y Ca_{DTPA} $r=0.64$. El $P_{\text{Mehlich-3}}$ se correlaciona con el pH de manera más débil y con menor significación y en sentido negativo, tanto en el $P_{\text{Mehlich-3}}$ ($r=-0.25$) como en el P_{DTPA} ($r=-0.24$). Además el P presenta una correlación de alta significación, de sentido negativo con la materia orgánica (MO) siendo su coeficiente de correlación $r=-0.32$. En cuanto a las correlaciones con la conductividad eléctrica aparente del suelo, ambos elementos se correlacionan en alguna medida con las mismas. El $P_{\text{Mehlich-3}}$ y el P_{resina} se correlacionan de manera altamente significativa y de sentido positivo con la CE_aH , siendo sus coeficientes de correlación $r=0.47$ y $r=0.30$ respectivamente. En cuanto al Ca, solamente el Ca_{resina} tiene correlaciones lineales con la CE_a , en este caso tanto en el dipolo horizontal como con el vertical. La correlación $Ca_{\text{resina}}-CE_aH$ es altamente significativa, de sentido positivo con un $r=0.30$; por otro lado la correlación del $Ca_{\text{resina}}-CE_aV$ es únicamente significativa, positiva y débil ($r=0.24$). Estas correlaciones con la CE_a del Ca y el P eran esperadas dado que la CE_a es un indicador de la salinidad del suelo. El ion Ca^{2+} , forma parte de los iones generalmente asociados a la salinidad del suelo (USDA, 1999). En cuanto al P, el contenido del mismo también forma parte de la salinidad del suelo, siendo su incremento en los suelos cultivados debido a la degradación de la materia orgánica y del abonado (HEINIGER, *et al.*, 2003).

Micronutrientes

El contenido en micronutrientes (Fe, Mn, Cu y Zn) ha sido determinado con dos soluciones extractantes Mehlich-3 y DTPA. Las cantidades extraídas mediante Mehlich -3 fueron mayores que con la solución DTPA.

El micronutriente con mayor contenido medio extraído tanto por un método como por el otro ha sido el Fe ($354.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción con Mehlich-3 y $107.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción con DTPA); siendo además el elemento químico que presenta una cantidad

media de extracción mayor después del Ca. Las cantidades medias de Mn en suelo estudiado son $1.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ tanto el extraído con Mehlich-3 como el extraído con el reactivo DTPA; datos similares también para los máximos y mínimos $0.25 - 4.55 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ con el reactivo Mehlich-3 y $0.27 - 3.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ extraído con DTPA. La cantidad media de Cu extraída mediante Mehlich-3 es mayor que la extracción con DTPA, $0.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ frente a $0.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente; no alcanzando $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en ninguna de las muestras y por ninguno de los dos métodos de extracción. La cantidad media de Zn extraído es también mayor en la extracción con Mehlich-3, $1.18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ frente a $0.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

En cuanto a los coeficientes de variación, el Fe y el Cu presentan los valores más bajos, 15.52% y 17.63% para la extracción con Mehlich-3 y 22.96% y 30.95% para DTPA respectivamente. El Zn y el Mn presentan coeficientes de variación muy elevados con 30.41% para Mehlich-3 y 68.82% para DTPA en el caso del Zn y 74.97% con Mehlich-3 y 66.39% con DTPA para el Mn. El orden creciente de los coeficientes de variación sería el siguiente: extracción por Mehlich-3: $\text{Fe} < \text{Cu} < \text{Zn} < \text{Mn}$ extracción por DTPA: $\text{Fe} < \text{Cu} < \text{Mn} < \text{Zn}$.

Atendiendo a los coeficientes de asimetría y curtosis, así como los histogramas obtenidos (Figura 4.14 y Figura 4.15); podemos asumir la normalidad de los datos de todos los elementos (teniendo cuenta ambas extracciones) salvo en el caso del Mn y Zn (en las dos extracciones).

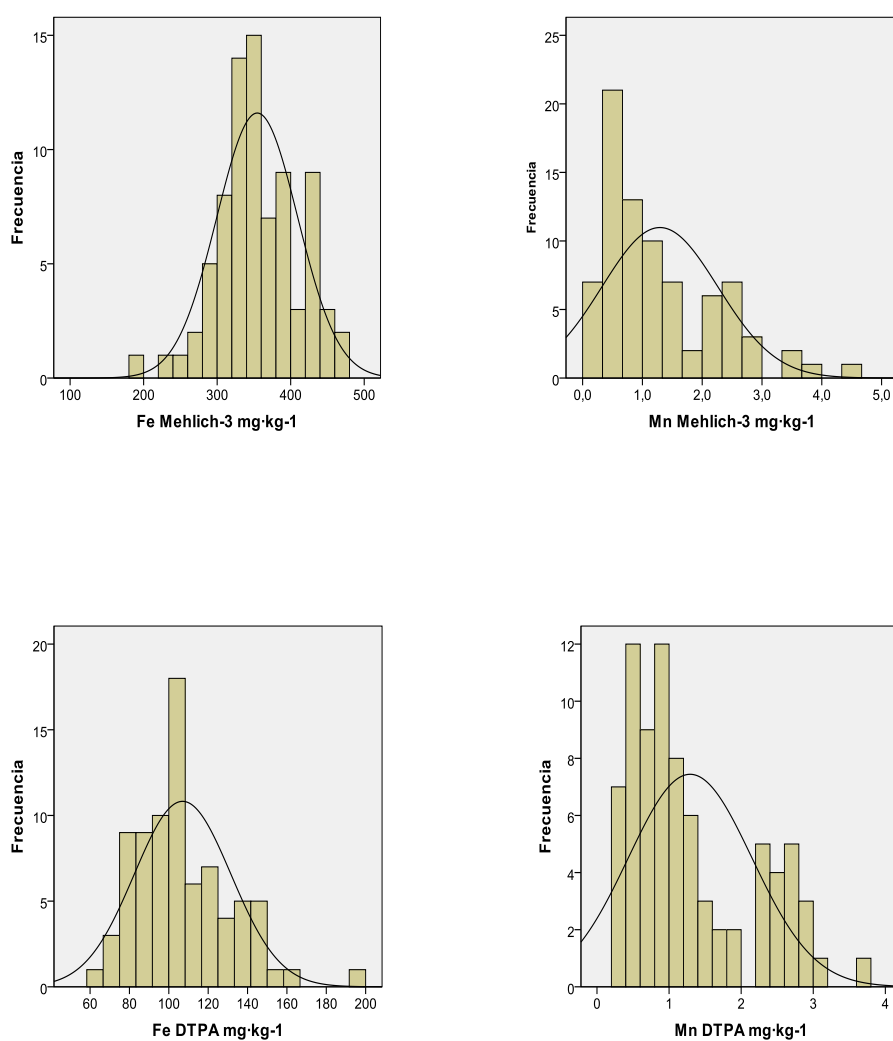


Figura 4.14.- Histogramas del contenido de Hierro y Manganeso, extraídos mediante Mehlich-3 y DTPA.

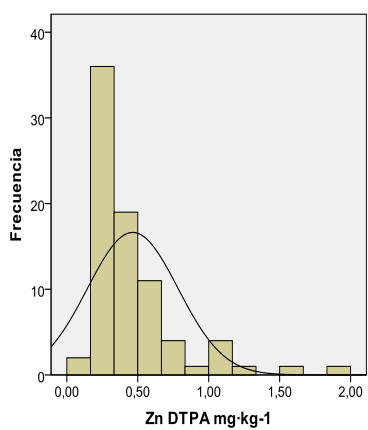
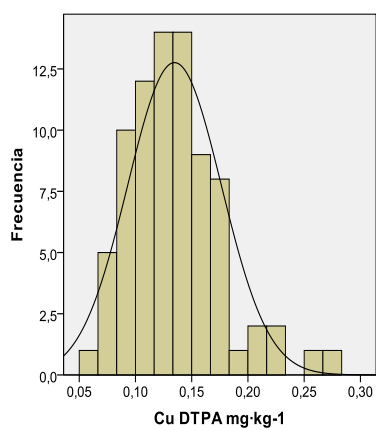
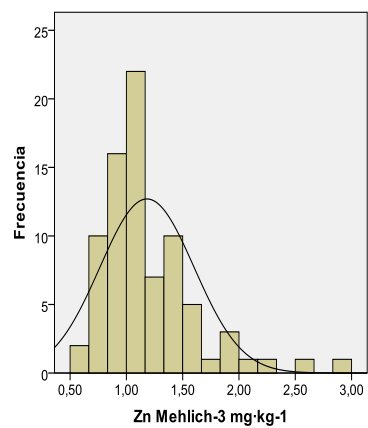
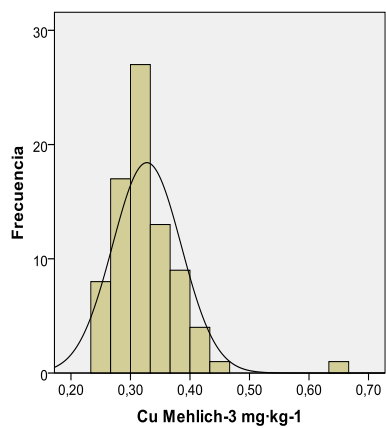


Figura 4.15.- Histogramas del contenido de Cobre y Zinc, extraídos mediante Mehlich-3 y DTPA.

Las correlaciones lineales entre los micronutrientes están reflejadas en la Tabla 4.29.

Mehlich-3				
Elemento	Fe	Mn	Cu	Zn
Fe	1	0.24*	-0.27*	
Mn		1		
Cu			1	0.23*
Zn				1
DTPA				
Elemento	Fe	Mn	Cu	Zn
Fe	1	0.26*		
Mn		1		0.28*
Cu			1	0.33**
Zn				1
Mehlich-3 - DTPA				
Elemento	Fe (DTPA)	Mn (DTPA)	Cu (DTPA)	Zn(DTPA)
Fe (Mehlich-3)	0.73**	0.30**		
Mn (Mehlich-3)		0.95**		0.23*
Cu (Mehlich-3)			0.49**	
Zn (Mehlich-3)			0.27*	0.81**

Tabla 4.29.- Matriz de correlación entre los micronutrientes extraídos con Mehlich-3 y con DTPA (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

En la extracción con Mehlich-3 el Fe se correlaciona de forma únicamente significativa y de sentido negativo con el Cu, con un $r = -0.27$, y en sentido positivo con el Mn, con un y coeficiente de correlación $r = 0.24$. El Cu además se correlaciona con el Zn, siendo esta correlación solamente significativa, de sentido positivo y débil ($r = 0.23$). En cuanto a la extracción con DTPA, aparece una correlación de alta significación y sentido positivo entre el Cu y el Zn, con un coeficiente de correlación $r = 0.33$. Además también existen dos correlaciones y únicamente significativas; entre el Fe y el Mn de sentido positivo y un coeficiente de correlación $r = 0.26$ y otra entre Mn - Zn, también débil y de sentido positivo ($r = 0.28$). Las correlaciones entre elementos extraídos mediante Mehlich-3 y los extraídos por DTPA: el $Fe_{\text{Mehlich-3}}$ y el Fe_{DTPA} tienen una correlación altamente significativa (y de sentido positivo) con un coeficiente de correlación $r = 0.73$, el $Fe_{\text{Mehlich-3}}$ y

el Mn_{DTPA} se correlacionan con alta significación y sentido positivo presentando un coeficiente $r=0.30$. El $Cu_{Mehlich-3}$ y el Cu_{DTPA} tienen un coeficiente de correlación $r=0.49$, con alta significación; el $Mn_{Mehlich-3}$ y el Mn_{DTPA} muestran un coeficiente de correlación $r=0.95$ (también es una correlación altamente significativa), siendo la más fuerte de todas las correlaciones entre los micronutrientes; por último, el coeficiente de correlación (altamente significativa) entre el $Zn_{Mehlich-3}$ y el Zn_{DTPA} es $r=0.81$. En este caso de profundidad ponderada, aparecen dos correlaciones más, siendo estas solo significativas y ambas positivas, entre $Mn_{Mehlich-3} - Zn_{DTPA}$ y $Zn_{Mehlich-3} - Cu_{DTPA}$ con coeficientes de correlación $r=0.23$ y $r=0.27$ respectivamente.

Las correlaciones lineales entre los micronutrientes y los macronutrientes están reflejadas en la Tabla 4.30.

	Mehlich-3		Resina	
Mehlich-3	Ca	P	Ca	P
Fe				
Mn	0.46**		0.52**	
Cu		0.28*		
Zn	0.24*	0.31**	0.25*	0.32**
	Mehlich-3		Resina	
DTPA	Ca	P	Ca	P
Fe				0.23*
Mn	0.36**		0.46**	
Cu		0.34**		0.32**
Zn		0.34**	0.22*	0.42**

Tabla 4.30.- Matriz de correlación entre los micronutrientes y macronutrientes extraídos con Mehlich-3, resina y con DTPA (* nivel de significación para $p<0.05$; ** nivel de significación para $p<0.01$).

El $Fe_{Mehlich-3}$ no tiene ninguna correlación significativa con Ca y P, como era previsible dado que esto mismo ocurría en el estudio de las profundidades anteriores; el Fe_{DTPA} sin embargo tiene una correlación de solamente significativa y de sentido positivo del Fe con el P_{resina} , con un $r=0.23$. Los $Mn_{Mehlich-3}$ y Mn_{DTPA} presentan correlaciones con el

Ca, (tanto el obtenido con Mehlich-3 como el obtenido por resina); siendo estas cuatro correlaciones altamente significativas y positivas, con coeficientes de correlación débiles a moderados comprendidos entre 0.36 - 0.52; el Mn es el elemento que presenta unas correlaciones más fuertes con los macronutrientes. El $Cu_{Mehlich-3}$ muestra un coeficiente de correlación positivos $r=0.28$ (para un $p<0.05$) con el $P_{Mehlich-3}$; el Cu_{DTPA} por su parte, tiene un coeficiente de correlación $r=0.34$ (para un $p<0.01$) con el $P_{Mehlich-3}$, y un $r=0.32$ con el P_{Resina} ($p<0.01$). El $Zn_{Mehlich-3}$ tiene correlaciones lineales solo significativas y débiles (de sentido positivo) con el Ca extraído por Mehlich-3, ($r=0.24$) y con el Ca extraído por resina($r=0.25$). Con el P, el $Zn_{Mehlich-3}$ tiene correlaciones lineales altamente significativas de sentido positivo con ambas extracciones del macronutriente y de muy similar magnitud, $r=0.31$ con el P extraído por Mehlich-3 y $r=0.32$ con el P extraído por resina. El $Zn_{Mehlich-3}$ se correlaciona linealmente con el Ca extraído mediante resina, siendo la correlación positiva, únicamente significativa y débil ($r=0.22$). El $Zn_{Mehlich-3}$ se correlaciona de manera altamente significativa y de sentido positivo con el P, bien haya sido extraído por Mehlich-3 o por resina, con unos coeficientes de correlación: $r=0.34$ y $r=0.42$ respectivamente.

Las correlaciones lineales entre los micronutrientes y las propiedades generales se muestran en la Tabla 4.31. En este caso no se han tenido en cuenta las fracciones granulométricas y se han incluido las medidas de conductividad eléctrica aparente, tanto en el dipolo vertical como en el horizontal.

Elemento/Propiedad	pH	MO	CIC	CE _a -H	CE _a -V
Fe(Mehlich-3)					
Mn (Mehlich-3)	0.48**		-0.24*		
Cu(Mehlich-3)					
Zn(Mehlich-3)					
Fe(DTPA)				0.24*	0.39**
Mn(DTPA)	0.37**		-0.30**		
Cu(DTPA)					
Zn(DTPA)					

Tabla 4.31.- Matriz de correlación entre los micronutrientes (extraídos con Mehlich-3 y con DTPA) y las propiedades generales (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

Ni el $Fe_{Mehlich-3}$ ni el Fe_{DTPA} presentan correlación lineal con las propiedades generales. El $Mn_{Mehlich-3}$ tiene una correlación lineal altamente significativa y de sentido positivo, moderada, $r=0.48$ con el pH y otra solo significativa, negativa y débil ($r=-0.24$) con la capacidad de intercambio catiónico (CIC). El Mn_{DTPA} se correlaciona positivamente con el pH (para $p < 0.01$) y con un coeficiente de correlación $r=0.37$, además el Mn_{DTPA} se correlaciona negativamente y con alta significación la capacidad de intercambio catiónico (CIC), con un $r=-0.30$. Por último el Cu (tanto el extraído por Mehlich-3 como por el reactivo DTPA) no presenta correlaciones lineales con las propiedades generales ni con la CE_a . En cuanto a las correlaciones con la CE_aH y CE_aV , únicamente el Fe_{DTPA} se correlaciona con las mismas. La relación lineal $Fe_{DTPA}-CE_aH$ es solo significativa, positiva y débil ($r=0.24$) mientras que la correlación $Fe_{DTPA}-CE_aV$ es altamente significativa y positiva con un $r=0.39$.

Metales pesados

Las cantidades extraídas están reflejadas en la Tabla 4.26. Las concentraciones de metales pesados determinados por cualquiera de los dos métodos quedan por debajo de los valores considerados como tóxicos.

Las concentraciones de Cd varían; situándose la concentración extraída con Mehlich-3 en un rango entre $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y $0.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; mientras que las concentraciones extraídas por DTPA oscilan entre $0.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y $0.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. La cantidad media para el Cd extraído mediante Mehlich-3 es de $0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y de $0.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ si ha sido obtenido por el reactivo DTPA. En la extracción por Mehlich-3 las concentraciones de Cr oscilan entre un mínimo de $0.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y un máximo de $0.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En el caso de la extracción por DTPA, el rango es amplio, entre $0.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y $0.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. La cantidad media del Cr extraído mediante Mehlich-3 es de $0.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y de $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para el obtenido por DTPA. En la extracción de Ni mediante Mehlich-3 se obtienen unas cantidades considerablemente superiores (prácticamente el doble) a las obtenidas por DTPA $0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ frente a $0.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. El Pb es el metal pesado extraído en una mayor cantidad, con una concentración media superior a $3.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción con Mehlich-3 y a $2.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la extracción mediante DTPA.

El Cd presenta unos coeficientes de variación similares para las dos extracciones, 19.25% para el Mehlich-3 y 20.65% para DTPA, sin embargo El Cr presenta valores muy dispares comparando las dos extracciones; un coeficiente de variación de 17.06% para Mehlich-3, mientras que en la extracción por DTPA presenta un coeficiente de variación de 107.73%, siendo este el más alto de todos los elementos químicos estudiados. El Ni es el metal pesado que tiene un coeficiente menor, de 16.51% en la extracción por Mehlich-3 y de 22.37% en el caso de de la extracción mediante DTPA. El Pb por su parte tiene unos coeficientes de variación de 25.87% en el caso de Mehlich-3 y de 31.43% en la extracción por el reactivo DTPA. El orden creciente de los coeficientes de variación sería el siguiente: Extracción por Mehlich-3: $\text{Ni} < \text{Cr} < \text{Cd} < \text{Pb}$, extracción por DTPA: $\text{Cd} < \text{Ni} < \text{Pb} < \text{Cr}$.

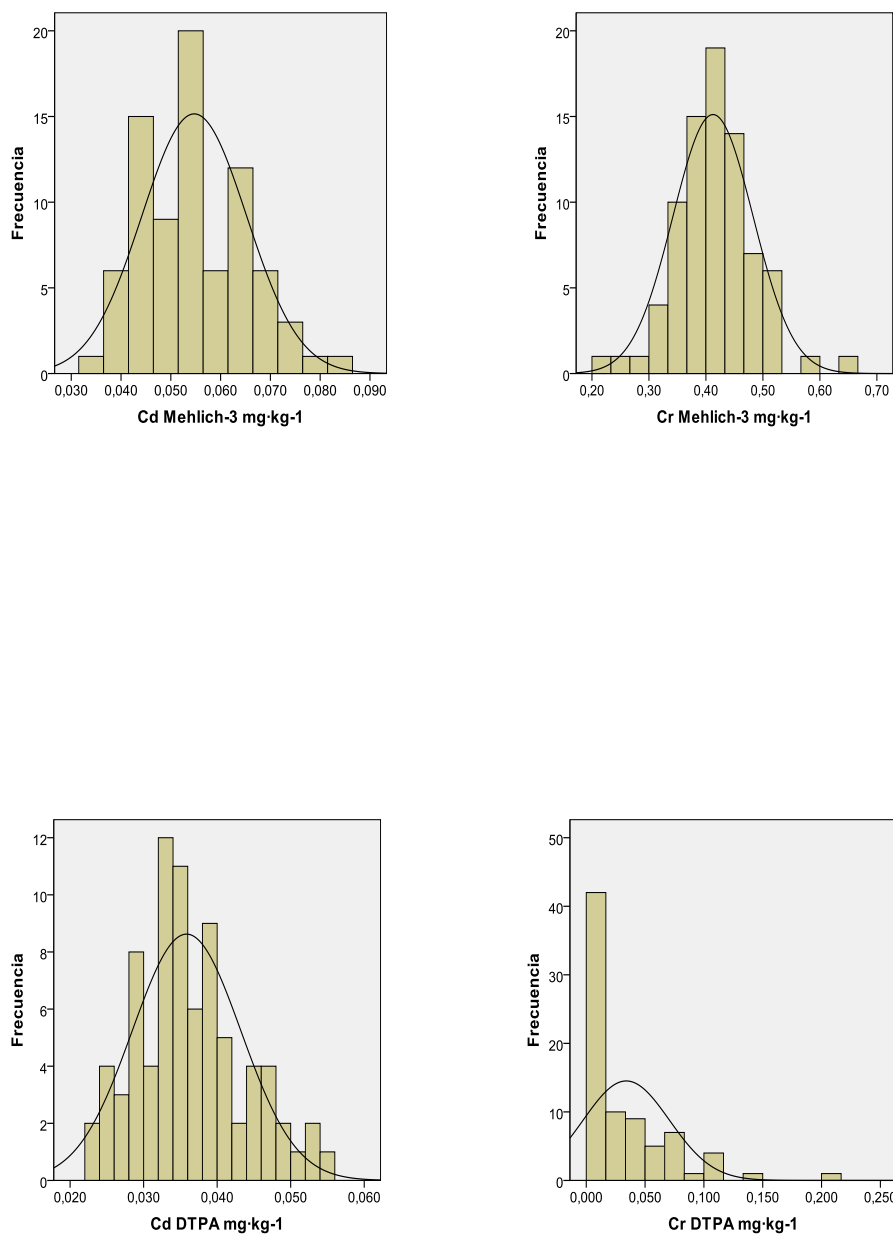


Figura 4.16.- Histogramas del contenido de Cadmio y Como, extraídos mediante Mehlich-3 y DTPA.

Atendiendo a los histogramas (Figura 4.16 y Figura 4.17), coeficientes de asimetría, curtosis y los histogramas de la distribución de frecuencias, en la extracción por Mehlich-3 de los metales pesados; se puede asumir la normalidad de los datos de todos los elementos estudiados; mientras que en la extracción mediante el reactivo DTPA el Pb y el Cr no serían normales.

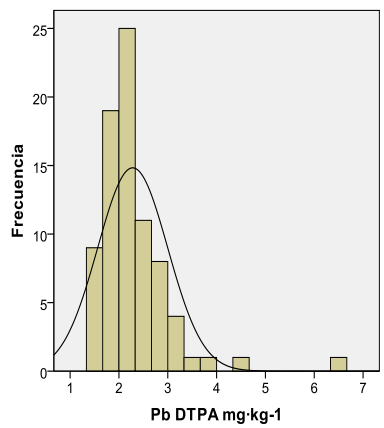
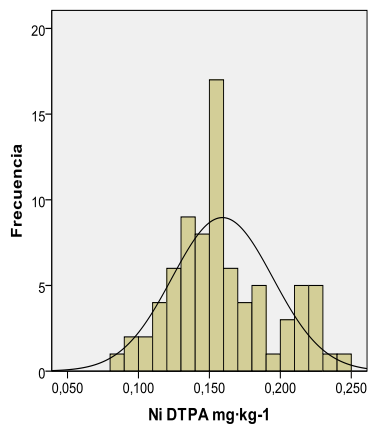
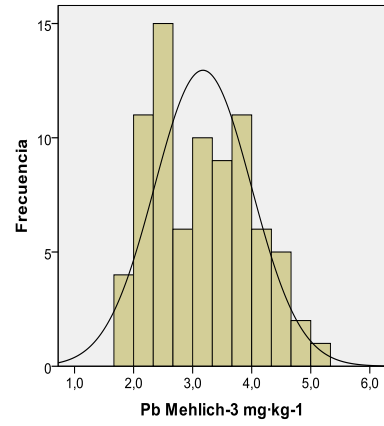
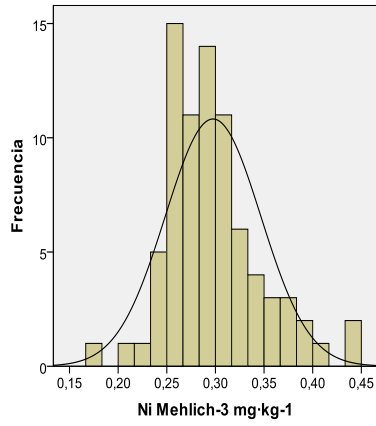


Figura 4.17.- Histogramas del contenido de Níquel y Plomo, extraídos mediante Mehlich-3 y DTPA.

La matriz de correlaciones entre los metales pesados se muestra en la Tabla 4.32.

Mehlich-3				
Elemento	Cd	Cr	Ni	Pb
Cd	1		0.46**	
Cr		1		-0.34**
Ni			1	
Pb				1
DTPA				
Elemento	Cd	Cr	Ni	Pb
Cd	1	0.33**	0.42**	
Cr		1		
Ni			1	0.26*
Pb				1
Mehlich-3 - DTPA				
Elemento	Cd (DTPA)	Cr (DTPA)	Ni (DTPA)	Pb(DTPA)
Cd (Mehlich-3)	0.82**	0.33**	0.35**	
Cr (Mehlich-3)				-0.22*
Ni (Mehlich-3)	0.43**		0.70**	
Pb (Mehlich-3)	0.29*		0.27*	0.77**

Tabla 4.32.- Matriz de correlación entre los metales pesados extraídos con Mehlich-3 y con DTPA (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

En el caso de la extracción de los elementos mediante el reactivo Mehlich-3, aparecen únicamente dos correlaciones: entre el Cd y el Ni, de alta significación, sentido positivo y moderada ($r=0.46$); y entre el Cr y el Pb, de alta significación, sentido negativo y débil ($r=-0.34$). En la extracción de elementos por DTPA, las correlaciones son tres. El Cd se correlaciona de forma altamente significativa y sentido positivo con el Cr y el Ni ($r=0.33$ y 0.42 respectivamente). El Ni y el Pb se correlacionan de manera únicamente significativa, sentido positivo y con un coeficiente de correlación débil, $r=0.26$. El Cr extraído mediante DTPA no se correlaciona con el resto de elementos extraídos por este método. Las relaciones lineales entre los elementos extraídos por Mehlich-3 y los extraídos por DTPA son las más numerosas. El $Cd_{\text{Mehlich-3}}$ se correlaciona de manera altamente significativa y sentido positivo con el Cd_{DTPA} , el Cr_{DTPA} y el Ni_{DTPA} , con unos coeficientes de correlación:

$r=0.82$, $r=0.33$ y $r=0.35$ respectivamente. El $Cr_{Mehlich-3}$ tiene una correlación lineal únicamente significativa y de sentido negativo con el Pb_{DTPA} con un $r=-0.22$. El $Ni_{Mehlich-3}$ presenta dos correlaciones lineales altamente significativas y de sentido positivo con el Cd_{DTPA} y el Ni_{DTPA} , con unos coeficientes de correlación $r=0.43$ y $r=0.70$. El $Pb_{Mehlich-3}$ tiene correlación altamente significativa de sentido positivo y fuerte con el $Pb_{Mehlich-3}$ ($r=0.77$) y correlaciones solo significativas y sentido positivo con el Cd_{DTPA} y el Ni_{DTPA} con unos coeficientes de correlación: $r=0.29$, $r=0.27$ respectivamente.

La matriz de correlaciones entre los metales pesados y los macronutrientes se muestra en la Tabla 4.33

	Mehlich-3		Resina	
Mehlich-3	Ca	P	Ca	P
Cd		0.70**		0.68**
Cr				
Ni		0.40**		0.35**
Pb		0.37**		
	Mehlich-3		Resina	
DTPA	Ca	P	Ca	P
Cd		0.68**		0.67**
Cr				
Ni		0.31**		0.31**
Pb				

Tabla 4.33. Matriz de correlación entre los metales pesados y los macronutrientes extraídos con Mehlich-3 y con DTPA (* nivel de significación para $p<0.05$; ** nivel de significación para $p<0.01$).

El $Cd_{Mehlich-3}$ tiene dos correlaciones de alta significación y sentido positivo con el $P_{Mehlich-3}$ y el P_{resina} , con coeficientes de correlación moderados ($r=0.70$ y $r=0.68$, respectivamente); el Cd_{DTPA} se comporta de la manera similar, correlacionándose con alta significación y sentido positivo con los $P_{Mehlich-3}$ y P_{resina} , con coeficientes de correlaciones casi iguales al caso anterior ($r=0.68$ y $r=0.67$, respectivamente). El Cr no tiene correlaciones con los macronutrientes. El $Ni_{Mehlich-3}$, por su parte, muestra una correlación con alta

significación y sentido positivo con el P obtenido por Mehlich-3 y con el P obtenido por resina, con coeficientes de correlación $r=0.40$ y $r=0.35$ respectivamente. El Ni_{DTPA} actúa de forma pareja con dos correlaciones altamente significativas, de sentido positivo con el $P_{Mehlich-3}$ y el P_{resina} ($r=0.31$ en ambos casos). Por último el $Pb_{Mehlich-3}$ tiene una correlación altamente significativa, de sentido positivo con el $P_{Mehlich-3}$ con un coeficiente de correlación: $r=0.37$.

La matriz de correlaciones entre los metales pesados y los micronutrientes se muestra en la Tabla 4.34.

	Mehlich-3				DTPA			
Mehlich-3	Fe	Mn	Cu	Zn	Fe	Mn	Cu	Zn
Cd					0.30**		0.24*	
Cr			-0.24*					
Ni			0.46**				0.28*	
Pb	-0.32**		0.35**					
	Mehlich-3				DTPA			
DTPA	Fe	Mn	Cu	Zn	Fe	Mn	Cu	Zn
Cd			0.24*		0.46**		0.33**	0.23*
Cr					0.44**			
Ni			0.22*		0.26*		0.33**	
Pb								

Tabla 4.34. Matriz de correlación entre los metales pesados y los micronutrientes extraídos con Mehlich-3 y con DTPA (* nivel de significación para $p<0.05$; ** nivel de significación para $p<0.01$).

Las correlaciones más fuertes y significativas en la extracción de los metales pesados mediante el reactivo Mehlich-3 son las de $Ni_{Mehlich-3} - Cu_{Mehlich-3}$, $Pb_{Mehlich-3} - Cu_{Mehlich-3}$ y $Cd_{Mehlich-3} - Fe_{DTPA}$ como correlaciones positivas, con unos coeficientes de correlación $r=0.46$, $r=0.35$ y $r=0.30$ respectivamente; y como correlación negativa $Pb_{Mehlich-3} - Fe_{Mehlich-3}$. Las relaciones lineales más destacables en la extracción de los metales pesados por DTPA son las del $Cd_{DTPA} - Fe_{DTPA}$, $Cr_{DTPA} - Fe_{DTPA}$, $Cd_{DTPA} - Cu_{DTPA}$, $Ni_{DTPA} - Fe_{DTPA}$; con coeficientes de correlación comprendidos entre 0.33 - 0.46.

La matriz de correlaciones entre los metales pesados y las propiedades generales se muestra en la Tabla 4.35.

Elemento/Propiedad	pH	MO	CIC	CE _a -H	CE _a -V
Cd(Mehlich-3)	-0.39**	-0.41**	0.26*	0.27*	0.47**
Cr(Mehlich-3)					
Ni(Mehlich-3)	-0.38**	-0.26*		0.26*	0.30**
Pb(Mehlich-3)		-0.23*			0.40**
Cd (DTPA)	-0.23*	-0.25*		0.24*	0.37**
Cr(DTPA)					
Ni(DTPA)	-0.35**			0.34**	0.37**
Pb(DTPA)					0.30**

Tabla 4.35. Matriz de correlación entre los metales pesados (extraídos con Mehlich-3 y con DTPA) y las propiedades generales (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

Aparecen numerosas correlaciones entre los metales pesados y las propiedades generales del suelo. El $Cd_{Mehlich-3}$ tiene una correlación altamente significativa y de sentido negativo con el pH y la materia orgánica (MO), con unos coeficientes de correlación $r = -0.39$ y $r = -0.41$ respectivamente; y otra también altamente significativa aunque de carácter positivo con la CE_aV , siendo $r = 0.47$. El Cr no presenta ninguna correlación, ya sea el obtenido mediante Mehlich-3 o mediante DTPA. El $Ni_{Mehlich-3}$ presenta correlaciones altamente significativas con el pH, de sentido negativo ($r = -0.38$) y con la CE_aV , de sentido positivo ($r = 0.30$). El Ni_{DTPA} , se comporta de forma similar, con unos coeficientes de correlación $r = -0.35$ con el pH y $r = 0.37$ con la CE_aV (ambos para un $p < 0.01$); y además presenta una correlación altamente significativa más, con la CE_aH , con un $r = 0.34$. Las correlaciones más significativas y fuertes del Pb son con la CE_aV (de sentido positivo); la correlación $Pb_{Mehlich-3} - CE_aV$ tiene un coeficiente de correlación $r = 0.40$ y la correlación $Pb_{DTPA} - CE_aV$ tiene un $r = 0.30$.

Análisis de componentes principales (Mehlich-3)

	CP1	CP2	CP3	CP4
Autovalores	2.205	1.283	1.261	1.046
Proporción Varianza	0.276	0.16	0.158	0.131
Varianza acumulada	0.276	0.436	0.594	0.724
Variables del CP				
Cd	0.492**	0.645**	-0.038	0.036
Cr	-0.483**	0.191	0.220*	0.726**
Ni	0.631**	0.584**	0.007	0.086
Pb	0.667**	-0.389**	0.065	-0.109
Cu	0.732**	-0.027	0.368**	0.004
Fe	-0.494**	0.553**	0.155	-0.290**
Mn	-0.317**	0.094	0.573**	-0.585**
Zn	0.078	-0.148	0.848**	0.268*
Correlaciones CPsQuímica, altura, CEaV, CEaH, CPs Pgenerales y CPsTopografía				
Altura	-0.376**	-0.279*	0.272*	-
CEaV	0.433**	-	-	-
CEaH	-	0.237*	-	-
CPG1	-	-	0.427**	-0.378**
CPG2	0.457**	-	-	-
CPG3	-	-	-	-
CPG4	-	-	-	-
CPT1	-	-	-	-
CPT2	0.105**	-	-	-

Tabla 4.36. Componentes Principales de los elementos extraídos con Mehlich-3 en el Horizonte A. (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

En la Tabla 4.36 se muestra es análisis de componentes principales realizado de las propiedades químicas extraídas mediante Mehlich-3 de la zona de estudio. Se observa que el 72% de la variabilidad de los datos quedan explicados mediante cuatro componentes principales (CP) con autovalores superiores a 1.

El primer componente, **CP₁**, explica el 27% de la variabilidad, en el cual, todos los elementos salvo el Zn contribuyen al mismo. El orden decreciente de los pesos de los elementos en el componente es: Cu>Pb>Ni>Fe>Cd>Cr>Mn. El Fe, Mn y Cr se asocian con signo negativo, mostrando tendencia a disminuir cuando aumentan los otros 4

elementos. El **CP₂** explica un 16% adicional de la variabilidad, contribuyen al componente 4 elementos, por orden de importancia Cd, Ni, Fe y Pb. El Pb contribuye con signo negativo frente a los demás elementos que lo hacen con positivo, de forma que estos tenderían a aumentar al disminuir el Pb. El tercer componente, **CP₃** explica un 11.3% más de la variabilidad, ordenándose decrecientemente por pesos: Zn>Mn>Cu>Cr. Todos los elementos se asocian positivamente en el componente. El cuarto componente, **CP₄**, explica un 13% adicional de la variabilidad, 4 elementos participan en el componente, ordenándose decrecientemente por pesos: Cr>Mn>Fe>Zn. Mn y Fe se asocian con signo negativo, tendiendo a aumentar cuando disminuyen Cr y Zn. En el horizonte A se obtienen 4 componentes principales frente a los 3 que se obtenían en el estudio de las profundidades tanto 0-20 cm como >20 cm.

El CP₁ presenta una correlación altamente significativa con la altura ($r=-0.38$), la CEaV ($r=0.43$), el componente principal CPG₂ de las propiedades generales (las fracciones granulométricas son los elementos destacados, $r=0.46$) y con el componente principal CPT₂ de la topografía ($r=0.10$). El segundo componente no presenta correlaciones altamente significativas. El CP₃ presenta una correlación de alta significación con el componente principal CPG₁ de las propiedades generales ($r=0.43$). El CP₄ tiene una correlación de alta significación (y sentido negativo) con el componente principal CPG₁ de las propiedades generales ($r=-0.38$).

Análisis de componentes principales (DTPA)

	CP1	CP2	CP3
Autovalores	2.282	1.436	1.343
Proporción Varianza	0.285	0.179	0.168
Varianza acumulada	0.285	0.465	0.633
Variables del CP			
Cd	0.810**	0.041	-0.171
Cr	0.339**	0.769**	-0.329**
Ni	0.568**	-0.531**	-0.280*
Pb	0.333**	-0.349**	-0.372**
Cu	0.560**	-0.448**	0.341**
Fe	0.734**	0.388**	-0.131
Mn	0.279*	0.295**	0.579**
Zn	0.383**	0.021	0.721**
Correlaciones CPsQuímica, altura, CEaV, CEaH, CPs Pgenerales y CPsTopografía			
Altura	-	-	0.330**
CEaV	0.358**	-	-0.245*
CEaH	0.279*	-	-
CPG1	-	-	0.413**
CPG2	0.241*	-0.392**	-
CPG3	-	-	-
CPG4	-	-	-
CPT1	-	-	0.242*
CPT2	-	-	-

Tabla 4.37. Componentes Principales de los elementos extraídos con DTPA en el Horizonte A. (* nivel de significación para $p < 0.05$; ** nivel de significación para $p < 0.01$).

En la Tabla 4.37 se muestra es análisis de componentes principales realizado de las propiedades químicas extraídas mediante DTPA de la zona de estudio. Se observa que el 63% de la variabilidad de los datos quedan explicados mediante tres componentes principales (CP) con autovalores superiores a 1.

El primer componente, **CP₁**, explica el 28% de la variabilidad, en el cual todos los elementos extraídos contribuyen al componente, el orden decreciente de los pesos en el componente es: Cd>Fe>Ni>Cu>Zn>Cr>Pb>Mn. Todos ellos asociados con signo

positivo en este primer componente El **CP₂** explica un 18% adicional de la variabilidad, siendo en este caso el orden decreciente del peso de los elementos en el componente el que sigue: Cr>Ni>Cu>Fe>Pb>Mn. Cr, Fe y Mn aparecen asociados con signo negativo, con lo cual muestran tendencia a disminuir cuando aumentan el resto de elementos del componente. El tercer componente, **CP₃**, explica un 16.8% más de la variabilidad, el orden de pesos de los elementos es: Zn>Mn>Pb>Cu>Cr>Ni. Zn Mn y Ni se asocian con signo positivo frente a Pb, Cr y Ni que los hacen con signo negativo.

El CP₁ presenta correlaciones con la CE_aV, con un coeficiente de correlación r=0.36. El segundo componente, CP₂ presenta una correlación altamente significativa con el componente principal CPG₂ de las propiedades generales (las fracciones granulométricas son los elementos destacados, r=-0.39). El CP₃ una correlación altamente significativa con la altura (r=0.33) y con el componente principal CPG₁ de las propiedades generales (pH, el Ca, el Al, H+Al, SB, CIC y V son los elementos principales; r=0.41).

4.5 CONCLUSIONES

1. En las dos profundidades estudiadas, y por lo tanto en el Horizonte A las concentraciones de elementos extraídos mediante Mehlich-3 son mayores que los determinados mediante DTPA, salvo para el caso del Mn, donde la concentración media es coincidente. El contenido de macronutrientes extraídos por Mehlich-3 en orden decreciente es: Ca>P>K, el de los elementos traza es: Fe>Pb>Mn>Zn>Cr>Cu>Ni>Cd; y para los elementos traza extraídos mediante DTPA: Fe>Pb>Mn>Zn>Ni>Cu>Cd>Cr; es así en las dos profundidades estudiadas.
2. En el Horizonte A, los coeficientes de variación de los elementos extraídos mediante el extractante Mehlich-3 aumentan de la siguiente manera para macronutrientes: K<P<Ca y los elementos traza de la siguiente forma: Fe<Ni<Cr<Cu<Cd<Pb<Zn<Mn. Los coeficientes de variación en la extracción DTPA de los elementos traza crecen de la siguiente manera: Cd<Ni<Fe<Cu<Pb<Mn<Zn<Cr. La magnitud de los coeficientes de variación no coincide en profundidad.
3. El contenido en $Ca_{\text{Mehlich-3}}$ es mayor (1.6 veces más elevado) en la profundidad >20 cm. Por el contrario el contenido en $P_{\text{Mehlich-3}}$ es más elevado (1.71 veces) en la profundidad 0-20cm. El contenido de $K_{\text{Mehlich-3}}$ a ambas profundidades es similar. En la extracción mediante resina el Ca y P se comportan igual que los extraídos mediante Mehlich-3, el contenido de Ca_{Resina} es más elevado (1.2 veces mayor) en la profundidad >20 cm y el P_{Resina} es mayor (2.08 veces) en la profundidad 0-20 cm. En cuanto al K_{Resina} es mayor (2.2 veces) en la profundidad 0-20 cm.

4. El contenido en Fe, Mn y Zn (Mehlich-3) es mayor a la profundidad >20 cm; y lo mismo ocurre con los contenidos de Mn, Cu y Zn (DTPA). Esto indica que los procesos de oxidación-reducción afectan de diferente manera a las dos profundidades. El contenido en Fe se considera adecuado para suelos agrícolas, los de Mn y Cu son bajos y el de Zn adecuado.
5. Las concentraciones de metales pesados obtenidos en el suelo por una u otra extracción están por debajo del umbral de riesgo para suelos agrícolas. El $Cd_{Mehlich-3}$ y el $Ni_{Mehlich-3}$ presentan concentraciones similares a las dos profundidades estudiadas, mientras que el $Pb_{Mehlich-3}$ es mayor a la profundidad 0-20 cm y el Cr a la profundidad >20 cm. El contenido de Ni_{DTPA} es similar a ambas profundidades, los contenidos de Cd_{DTPA} y Cr_{DTPA} son mayores a profundidad 0-20 cm y por último el contenido de Pb_{DTPA} es ligeramente superior a profundidad >20cm.
6. La CE_aH presenta correlaciones altamente significativas (positivas) con el $P_{Mehlich-3}$, el P_{Resina} y el Ca_{resina} . La CE_aV tiene un número de correlaciones altamente significativas más numerosas; se correlaciona (con alta significación y en sentido positivo) con el Fe_{DTPA} , Cd_{DTPA} , Ni_{DTPA} , Pb_{DTPA} , $Cd_{Mehlich-3}$, $Ni_{Mehlich-3}$ y $Pb_{Mehlich-3}$.
7. El análisis de los componentes principales del Horizonte A muestra que el primer componente de la extracción con Mehlich-3, intervienen todos los elementos estudiados (Fe, Mn y Cr se asocian negativamente), salvo el Zn; y explica el 27% de la variabilidad de los datos. En el primer componente de la extracción por DTPA, el cual explica el 28% de la variabilidad de los datos, se asocian todos los elementos estudiados con signo positivo.

8. En el Horizonte A, el CP_1 (Mehlich-3) presenta tres correlaciones altamente significativas; de sentido negativo con la altura de la parcela y de sentido positivo con la CE_aV (corroborando las correlaciones lineales obtenidas) y con el CPG_2 (donde destacaban las fracciones granulométricas). El CP_1 (DTPA) presenta una correlación altamente significativa con la CE_aV , reafirmando las correlaciones lineales obtenidas.

CAPÍTULO 5 ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO

5.1 INTRODUCCIÓN

Como resultado de los factores y procesos de formación del suelo se admite que las propiedades del mismo pueden presentar variabilidad espacial, incluso en distancias no muy grandes (TRANGMAR *et al.*, 1985; WARRICK *et al.*, 1986). Debido a la interacción de dichos factores con los procesos edafogenéticos, existe una amplia variedad de suelos y una variabilidad todavía mayor de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (JARAMILLO, 2011). Esta variabilidad tiene que ser considerada en los procesos de producción agrícola, por ello en los últimos años la denominada *agricultura de precisión* ha alcanzado un gran desarrollo (JOHANN, *et al.*, 2004). La variabilidad dependerá en función de la propiedad estudiada, siendo de mayor magnitud las propiedades químicas respecto de las físicas; por otro lado un suelo natural presenta propiedades de menor variabilidad que un suelo sometido a uso agrícola, siendo las propiedades más afectadas por el manejo del suelo las que presentan mayor variabilidad (PAZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2000; JARAMILLO *et al.*, 2012).

La estructura espacial de las propiedades del suelo depende de procesos químicos, físicos y biológicos, que actúan a distintas escalas espaciales. La caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo es fundamental para comprender mejor la dependencia que las mismas presentan de los distintos factores medioambientales. Se ha considerado que la variabilidad espacial es el principal tipo de variabilidad que afecta a los suelos, por lo que en los últimos tiempos se ha venido estudiando la adopción y adaptación de métodos para estudiar dicha variabilidad; de forma que pueda mejorarse su manejo y así obtener un mayor rendimiento y rentabilidad agropecuaria, así como permitir prácticas ambientales más adecuadas. Dado que los modelos de dependencia espacial de datos puntuales de las diferentes propiedades del suelo nos permiten estimar una propiedad en

puntos donde no haya sido muestreada; por ejemplo, puede utilizarse, esta estimación para recomendar dosis de fertilizantes o pesticidas. La variabilidad de las propiedades del suelo de interés agrícola es mayor en áreas extensas (SOUZA *et al.*, 2004); cuando se realiza un manejo localizado considerando la variabilidad, se favorece la reducción de costes de producción, puesto que se aprovechan mejor las materias primas y el uso de la maquinaria agrícola.

En la actualidad, la investigación de la variabilidad espacial en las ciencias del suelo se apoya en la Geoestadística, que junto con la estadística clásica conforman técnicas de gran importancia agronómica (CARVALHO *et al.*, 2003).

La Geoestadística ha sido definida como *“la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de los fenómenos naturales”* (MATHERON, 1962). Lo que distingue a una función aleatoria es que cada realización se puede concebir como suma de una componente estructurada y otra aparentemente errática. La componente estructurada es la que permite asegurar que, si nos encontramos en una zona que se han realizado varias medidas por encima de lo normal, lo más probable es que las medidas adicionales también sean altas. La componente aleatoria es la que impide predecir con exactitud el valor de las distintas medidas hipotéticas.

El fin de la Geoestadística es la caracterización del fenómeno natural, lo que conduce a diversas aplicaciones. El primero es la estimación a partir de un conjunto de medidas; el uso de esta técnica nos permite no solo estimar, sino obtener una medida de la incertidumbre. Además, al proporcionar medidas sobre la incertidumbre de la estimación, la Geoestadística es una herramienta ideal para seleccionar la ubicación de puntos de muestreo de forma que minimice la incertidumbre de estimación (MATHERON, 1963). La principal diferencia entre la estadística clásica y la Geoestadística es que mientras la primera no considera la posición espacial de los valores muestreados, la segunda sí que necesita

dicha posición espacial, dado que se considera que las muestras son dependientes en el espacio (STURARO, 1993).

Según MATHERON (1962), la Geoestadística puede definirse como la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de procesos o fenómenos geológicos en el espacio. Una variable distribuida en el espacio y que presente una estructura espacial de correlación se dice que está regionalizada. Desde un punto de vista matemático, una variable regionalizada es simplemente una función $z(x)$ que adopta un valor para cada punto x en el espacio. Las variaciones o fluctuaciones erráticas de la variable regionalizada impiden el tratamiento de la misma mediante funciones continuas. La Geoestadística permite establecer un modelo matemático que describa la variabilidad espacial de los datos, la cual será utilizada en el proceso de estimación para los puntos que no fueron muestreados; en definitiva el estudio estadístico de un fenómeno teniendo en cuenta su localización espacial, siendo a su vez caracterizado por la distribución en el espacio de una o más variables, las variables regionalizadas. (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978).

5.1.1 Conceptos esenciales en Geoestadística

Los conceptos teóricos de la Geoestadística aplicados a las Edafología tienen sus bases en funciones variables aleatorias (VIEIRA, 2000), siendo preciso relacionar el conjunto de datos estudiados con las hipótesis de la Geoestadística. Esto es necesario para que se puedan adecuar los datos a una función matemática que posibilite la determinación de la variabilidad espacial. COSTA (1999) y VIEIRA (2000) destacan que una variable regionalizada es estacionaria si los momentos estadísticos de esta variable son los mismos para cualquier posición en el campo de muestreo, no variando con la translación siempre que se cumpla:

- Una distancia h es igual a cero, indicando que no existe ninguna tendencia visual en el semivariograma, o sea, el semivariograma experimental alcanza una meseta dentro del área considerada.

- La varianza de las diferencias entre los puntos separados por una distancia h depende únicamente de esta distancia, que podemos llamar de “lag”. Esta característica implica la homogeneidad de la varianza entre puntos que tienen la misma distancia de separación entre ellos.

Las hipótesis principales en cualquier tipo de aplicación de la Geoestadística son la *hipótesis de estacionariedad de segundo orden*, *hipótesis intrínseca* y la *hipótesis de tendencia (kriging universal)* (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978; VIEIRA, 2000). La *estacionariedad de segundo orden* exige la existencia de varianza finita (VIEIRA, 2000), por esta razón, esta hipótesis será muy difícil satisfecha. La *hipótesis intrínseca* es la más conocida como hipótesis de estacionariedad fuerte (TRANGMAR *et al.*, 1985), en esta hipótesis es preciso comprender inicialmente que la estacionariedad de primer orden implica que el valor esperado de la función $Z(x_i)$ es el mismo para toda el área, independiente de la posición en el campo o de la distancia de separación (h). La *hipótesis intrínseca* considera que la media de los valores $Z(x_i)$ y la varianza de los incrementos $Z(x_i) - Z(x_i + h)$ son independientes de la localización en el área de muestreo, siendo función solamente del valor de h (distancia de separación entre muestras), requiriendo únicamente la existencia del semivariograma con meseta, sin la exigencia de varianza finita, esta hipótesis es la más frecuentemente utilizada en Geoestadística por ser menos restrictiva (VIEIRA, 2000). En la *hipótesis de tendencia*, los conjuntos de pares de semivarianza crecen sin límite para todos los valores de h calculados, cuando se ajustan a un modelo matemático. Este fenómeno presenta capacidad infinita de dispersión, no teniendo varianza finita, y su covarianza no puede ser definida. En muchos casos los momentos de una variable en función de la distancia no son estacionarios y el

fenómeno estudiado se caracteriza por exhibir una deriva o tendencia. Para tratar este tipo de variables se descompone la variable $Z(x)$ en suma de la deriva $m(x)$, tratada como función determinista, y una componente estocástica $\epsilon(x)$ que se puede tratar como función aleatoria intrínseca de media nula (SAMPER & CARRERA, 1990). Para que los datos sean interpolados sin tendencia y con varianza mínima por medio del *kriging*, es necesario que sean ajustados a un modelo matemático que represente la variabilidad de la propiedad estudiada. El semivariograma experimental es una herramienta básica de soporte para la técnica de *kriging*, pues permite representar numéricamente la variación de un fenómeno regionalizado (HUIJBREGTS, 1975).

5.1.2 Análisis y representación de la dependencia espacial

5.1.2.1. Semivariograma

El semivariograma muestral se obtiene a partir de la semivarianza; que mide la similitud existente entre observaciones situadas a una determinada distancia. Se obtiene mediante la siguiente relación:

$$\text{---} \tag{5.1}$$

Donde: s^2 es la semivarianza, $N(b)$ es el número de pares de observaciones comparadas en cada distancia (debe ser >50), $Z(X_i)$ es el valor de la variable en el sitio x , y $Z(X_i+b)$ es el valor de la variable en un sitio ubicado a una distancia b del sitio x . La dependencia espacial se manifiesta como una medida de la correlación entre muestras que disminuye con el aumento de la distancia de separación entre las mismas, y desaparece completamente cuando la distancia entre puntos de muestreo es suficientemente grande para que la dependencia espacial no pueda ser detectada, y en ese caso las muestras son consideradas estadísticamente independientes (VIEIRA, 2000).

El semivariograma (Figura 5.1) es una gráfica que relaciona los valores promedios de la semivarianza con el espaciamiento presente entre las muestras que se toman para hacer el estudio. Cuando una propiedad tiene dependencia espacial, la semivarianza aumenta, a medida que aumenta la distancia entre las muestras y la semivarianza puede llegar a estabilizarse a una determinada distancia, situación en la que se tiene un semivariograma estable. Cuando la semivarianza aumenta monótonamente con la distancia y no se estabiliza dentro del rango de distancias utilizadas para el muestreo, se tiene un semivariograma no transicional (WEBSTER & OLIVER, 2007).

Cuando se representan los valores de la semivarianza que le corresponden a cada intervalo de distancia considerado, se obtiene un gráfico de puntos denominado semivariograma experimental. A este semivariograma se le ajusta un modelo matemático denominado semivariograma teórico.

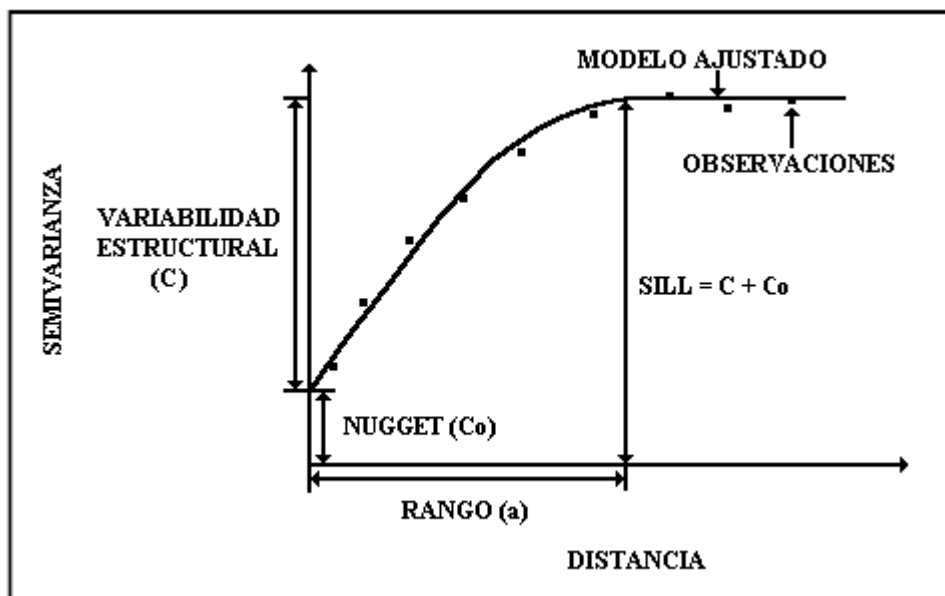


Figura 5.1. Estructura de un Semivariograma (de acuerdo con Jaramillo, 2003).

Para describir el semivariograma se utilizan los siguientes parámetros:

- *Efecto nugget* (C_0) - Por lo general, el semivariograma no tiende a cero como lo hace la distancia h , el efecto nugget es una discontinuidad de salto en el origen conocido también como *efecto pepita*, representa la discontinuidad en el semivariograma para distancias que sean menores que la menor distancia dada entre los puntos muestrales. Esta discontinuidad se puede dar también debido a errores en la medición o a una pobre precisión analítica.

- *Sill o meseta* (C_0+C) - Es el valor máximo que toma la semivarianza y es igual a la suma del nugget más la variabilidad estructural. Cuando el supuesto de estacionaridad se cumple, la meseta es muy similar a la varianza de los datos experimentales. La meseta es el valor de la semivarianza que se torna constante a partir de una determinada distancia, a partir de la cual hay independencia espacial. Cuando la meseta no se estabiliza, es decir, no se vuelve constante a ninguna distancia de las utilizadas en el muestreo, se dice que no se pudo resolver el problema de la variabilidad espacial de la propiedad en la zona de muestreo y el modelo más simple que se ajusta a los datos es lineal.

- *Variabilidad estructural* (C) - Es la variabilidad espacial de la variable. Es la diferencia entre la meseta y el nugget.

- *Rango o alcance* (a) - es la distancia a la cual el semivariograma se estabiliza y las muestras se relacionan espacialmente.

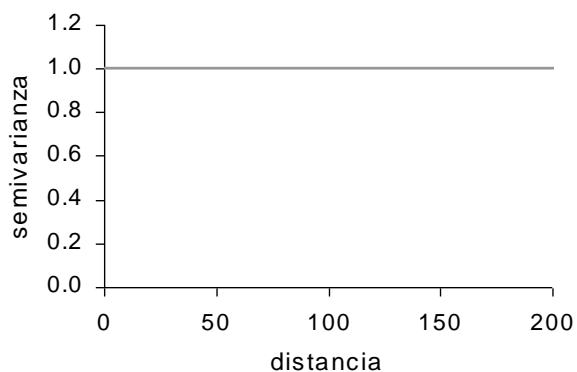
El semivariograma experimental por norma general se extiende hasta la mitad de la máxima distancia de separación de las muestras tomadas, ya que a partir de ahí la semivarianza se torna inestable. Según WEBSTER & OLIVER (2007), el semivariograma se estima mejor en distancias reducidas, y en ellas es donde debe ser modelizado para que los algoritmos de estimación geoestadísticos den resultados precisos.

Los modelos teóricos se ajustan al semivariograma experimental y son capaces de explicar los diferentes comportamientos que pueden tener las variables en el espacio. Las características más importantes a tener en cuenta en los modelos de semivariogramas son:

- Su comportamiento en el origen.
- Presencia o no, de meseta.

Los modelos más comunes son:

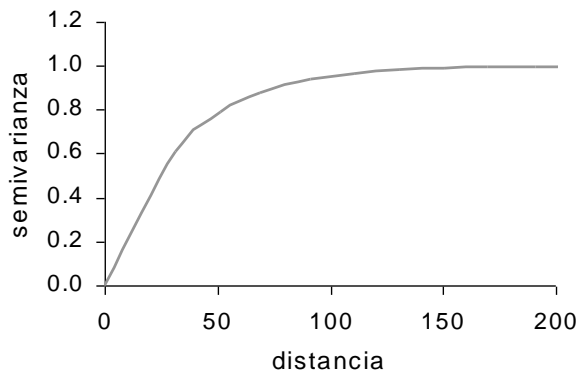
- *Efecto pepita puro* (Figura 5.2) - El modelo efecto pepita representa un fenómeno completamente aleatorio, conocido también como “ruido blanco”, en el cual no hay correlación espacial en las muestras independiente de cuál sea la distancia h que las separe. S representa el valor de la meseta.



$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } |h|=0 \\ s & \text{si } |h|\neq 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

Figura 5.2. *Efecto Pepita Puro.*

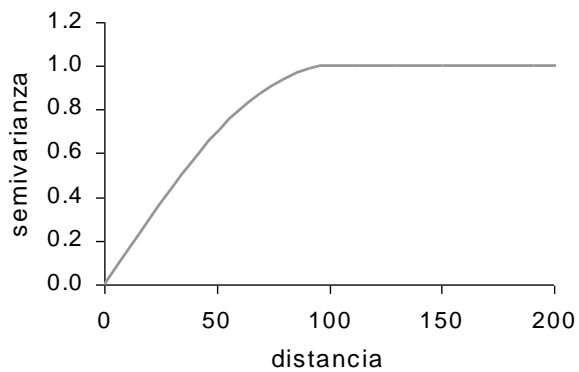
- *Modelo exponencial* (Figura 5.3) - En este modelo podemos observar que crece inicialmente más rápido y después se estabiliza de forma asintótica. Como la meseta no se alcanza a una distancia finita, se usa con fines prácticos el “alcance efectivo” o “alcance práctico”, se considera que el rango a , es la distancia para la cual el valor del semivariograma es el 95% de la meseta.



$$\gamma(h) = s \left(1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right) \quad (5.3)$$

Figura 5.3. Modelo exponencial.

- *Modelo esférico* (Figura 5.4) - Por lo general es de todos los modelos el más utilizado para análisis geoestadístico, es una expresión polinomial simple, en el gráfico se puede observar un crecimiento casi lineal y después a cierta distancia finita del origen se alcanza una estabilización, la meseta.

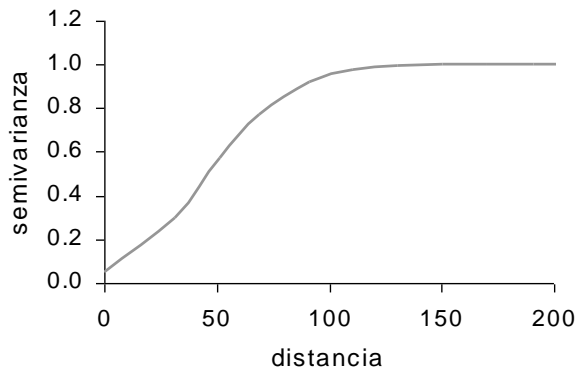


$$\gamma(h) = \begin{cases} s \left(\frac{3|h|}{2a} - \frac{1}{2} \frac{|h|^3}{a^3} \right) & \text{si } |h| \leq a \\ s & \text{si } |h| > a \end{cases} \quad (5.4)$$

Figura 5.4. Modelo esférico.

- *Modelo gaussiano* (Figura 5.5) - Este es un modelo continuo, inicialmente presenta un comportamiento parabólico en el origen, después al igual que en el modelo

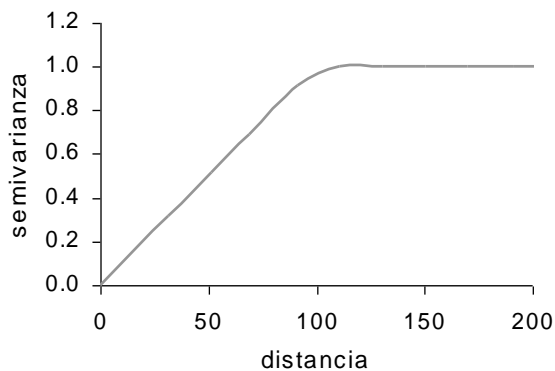
exponencial se alcanza la meseta de forma asintótica. Constituye el único modelo estacionario con un punto de inflexión.



$$\gamma(h) = s \left(1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right) \right) \quad (5.5)$$

Figura 5.5. *Modelo gaussiano.*

- *Modelo lineal* (Figura 5.6) - El modelo lineal no tiene sill ni rango. La meseta continúa aumentando mientras la distancia h aumenta, es utilizado para modelar fenómenos que presentan capacidad infinita de dispersión.



$$\gamma(h) = A(h) + B \quad (5.6)$$

Figura 5.6. *Modelo lineal.*

Los modelos anteriormente descritos, son modelos isotrópicos, es decir, la variabilidad espacial no depende de la dirección. Sin embargo, en la práctica aparecen variaciones anisotrópicas, habiendo en cada dirección un semivariograma diferente. Si esta anisotropía, puede tenerse en cuenta mediante una transformación lineal simple de las

coordenadas, decimos que es una anisotropía geométrica. Esta transformación, puede expresarse mediante la fórmula:

$$\Omega(\theta) = [A^2 \cos^2 (\theta-\Phi) + B^2 \sin^2 (\theta-\Phi)]^{1/2} \quad (5.7)$$

En la práctica se estudian cuatro direcciones, estimando los semivariogramas y determinando los rangos para los mismos, y luego se construye el gráfico direccional de los rangos para decidir si hay anisotropía geométrica presente o no. En presencia de anisotropía geométrica, el grado direccional de los rangos forman una elipse, en la cual el eje menor B es el rango de la dirección más rápida variación y A, el eje mayor, está en la dirección en que la variabilidad es más lenta. La relación $\lambda=A/B$ es una medida de anisotropía. En caso de anisotropía si se desea diseñar una red óptima de muestreo se debe hacer en forma rectangular haciendo coincidir los lados con las direcciones de los ejes 25 principales y las longitudes de los mismos deben estar en la proporción λ , donde el lado menor le correspondería a la dirección del eje. B. MARDIA (1980) ha sugerido pruebas de significación formales para la relación de anisotropía. Existen 3 tipos de anisotropía geométrica, zonal e híbrida.

La *anisotropía geométrica* (Figura 5.7) es aquella en la que el semivariograma presenta el mismo *sill*, pero rangos distintos. Presenta mayor continuidad espacial en la dirección de mayor rango y menor continuidad espacial en la dirección de menor rango.

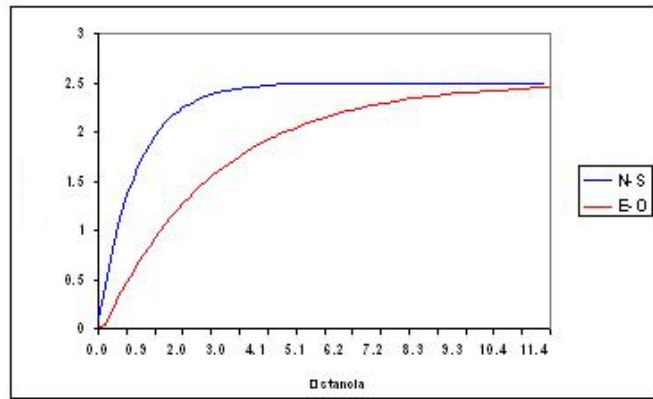


Figura 5.7. Anisotropía Geométrica (De acuerdo con GOOVAERTS, 1997).

La *anisotropía zonal* es aquella en la que el semivariograma en distintas direcciones presenta el mismo rango pero diferente *sill*.

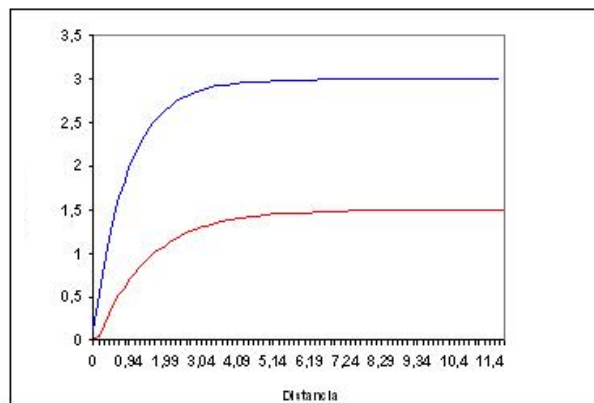


Figura 5.8. Anisotropía Zonal (De acuerdo con GOOVAERTS, 1997).

La *anisotropía híbrida* es aquella en la cual, el semivariograma en distintas direcciones presenta rangos diferentes y distintos *sill*.

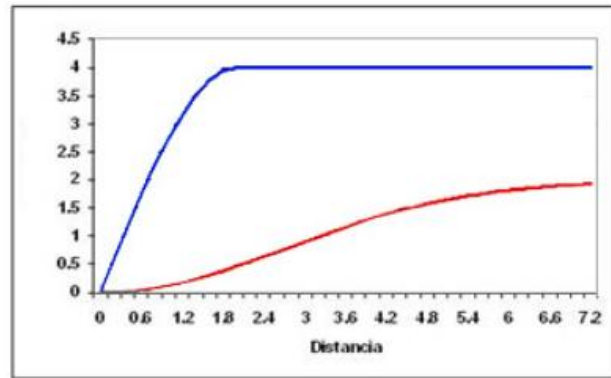


Figura 5.9. Anisotropía Híbrida (De acuerdo con GOOVAERTS, 1997).

5.1.2.2. Ajuste del Semivariograma

El análisis estructural es el proceso de definición del modelo geoestadístico que mejor se ajuste a los datos experimentales, en el marco del proceso de análisis de la variabilidad espacial. Este análisis implica especificar las hipótesis que se van a utilizar sobre la variabilidad del fenómeno estudiado. Es necesario definir si la variable se puede o no considerar estacionaria y si se requiera la definición de una tendencia determinista. Por ello, el análisis estructural se considera un punto de encuentro entre las descripciones cuantitativa y cualitativa de la realidad.

Dentro del análisis estructural se incluye la estimación del semivariograma, que constituye sin duda la tarea fundamental del mismo. Sin embargo, la estimación del semivariograma está tan ligada a las hipótesis previas sobre el tipo de variable que no conviene efectuar una separación entre ambos procesos (SAMPER & CARRERA, 1990). La estimación del semivariograma puede hacerse basándose exclusivamente en las medidas de la variable a estudiar. Sin embargo, el número de medidas necesarias para que la estimación sea fiable puede ser muy alto. Además, la selección de las hipótesis sobre la variable no es susceptible de un tratamiento riguroso al margen del número de datos. Por tanto, las decisiones tomadas durante el análisis estructural no pueden tener en cuenta sólo los datos cuantitativos y deben ser apoyadas con los cualitativos.

Por ello, la elección del método para ajustar modelos teóricos al semivariograma muestral y para estimar los parámetros de estos modelos (efecto pepita, meseta, alcance) todavía quedan sujetos a controversia (GOOVAERTS, 1999; PAZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2001). Existen diferentes métodos de ajuste, entre los que se incluyen, métodos automáticos y el ajuste “a sentimiento”. Se recomienda utilizar modelos de ajuste “mixtos” (GOOVAERTS, 1997), métodos interactivos con ayuda de programas gráficos antes que el uso de sofisticados procedimientos de ajuste automático. Al ajustar modelos teóricos al semivariograma muestral es necesario partir de la base de que para ello no sirve cualquier función matemática, un semivariograma típico ha de ser una función condicionalmente definida y tener valor nulo en el origen. No es sencillo comprobar si el semivariograma muestral cumple las condiciones necesarias para ser un modelo válido, y por ello se opta por ajustar uno de los modelos definidos “a priori” como válido del semivariograma muestral. Los principales métodos de ajuste empleados son:

- Método visual o ajuste “a sentimiento”.
- Método de los mínimos cuadrados.
- Métodos mixtos o semiautomáticos del tipo Jack-Knifing (validación cruzada).

Método visual, “ajuste a sentimiento”

No es más que un procedimiento de ensayo-error. Sobre este tipo de ajuste para seleccionar los parámetros de un semivariograma CLARK (1979) sostenía que había que tener en cuenta ciertas consideraciones:

- el modelo debe reflejar los principales aspectos del semivariograma; no se deben ajustar los mínimos detalles ya que en general no son características del semivariograma verdadero sino debido a fluctuaciones muestrales.
- el comportamiento de $\gamma^*(b)$ a grandes distancias y el conocimiento de la varianza muestral s^2 determinarán la presencia de meseta o no;

- el valor del efecto pepita (C_0) se puede obtener extrapolando los primeros puntos del semivariograma muestral hasta cortar el eje de ordenadas;
- puede lograrse un mejor ajuste al semivariograma muestral considerando modelos compuestos del tipo:

$$\gamma(h) = \sum_i \gamma_i(h) \quad (5.8)$$

Donde cada uno de los $\gamma_i(h)$ son modelos básicos ya mencionados anteriormente.

- El sentido común y el conocimiento físico del fenómeno o variable son fundamentales en todo el proceso de estimación del semivariograma.

Cuando diferentes modelos presentan ajustes similares, se debe seleccionar el más simple, ya que el más complicado generalmente no es el que deja las estimaciones más precisas.

Método de los mínimos cuadrados ponderados

Estima los parámetros del modelo teórico que mejor se ajusta (en términos de menor error cuadrático medio) al semivariograma experimental minimizando la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^{N_c} \omega_i \left[\gamma(h_i) - \gamma^*(h_i) \right]^2 \quad (5.9)$$

Donde:

$N_c = n^\circ$ de clases (intervalos) en los que se calcula el semivariograma muestral $\gamma^*(h)$

$\omega_i =$ pesos asignados a cada valor $\gamma^*(h)$ y corresponde al número de pares $N(h_i)$ que hay en cada intervalo (=en el i -ésimo intervalo).

En adelante para designar la suma de errores cuadráticos medios ponderados se utilizará la abreviatura WSS (Weighted sum of squared residuals) que procede del inglés.

TOUGH & LEYSHON (1985) adoptaron $\omega_i = N(b_i)/\sum N(b_i)$.

Existe también la alternativa de dar mayor peso a los primeros puntos, esto se consigue minimizando la siguiente ecuación (CRESSIE, 1985):

$$N(b_j)/[\gamma(b_k)]^2 \quad (5.10)$$

Éste criterio de la suma de cuadrados ponderados representa una medida de la bondad del ajuste. Pero hay que recalcar que el objetivo del ajuste de un modelo de semivariograma es “capturar” los patrones más importantes de dependencia espacial de la propiedad estudiada y no construir un modelo de semivariograma que se ajuste lo más posible a los valores experimentales. Así, por ejemplo, un modelo de continuidad espacial que tiene en cuenta información secundaria fidedigna debería de ser preferible a un modelo con un efecto pepita elevado que se ajuste con precisión a los datos de un semivariograma experimental discontinuo.

El valor de la WSS dependerá del número de *lags* considerados y de los pesos elegidos por el usuario. El modelo que produce el valor mínimo de este parámetro (WSS) no tiene porque ser el mismo para diferentes combinaciones de los factores que determinan el semivariograma experimental. Por lo tanto, el rango de modelos alternativos, aunque basado en criterios estadísticos, aún depende principalmente de las decisiones del usuario que son necesariamente subjetivas (GOOVAERTS, 1997).

Este método es ampliamente utilizado aunque existen estudios que muestran que el semivariograma obtenido por mínimos cuadrados ponderados difiere notablemente del semivariograma verdadero. Sobre todo cuando se dispone de pocos datos (SAMPER & CARRERA, 1990).

Método del "Jack-knifing"

Puede ocurrir que se tengan varios modelos teóricos que podrían representar el comportamiento de un semivariograma muestral. Al proceso de selección entre las posibles funciones teóricas se denomina validación del semivariograma (SAMPER & CARRERA, 1990).

El modelado del semivariograma no es un fin en sí mismo. El último objetivo es estimar la propiedad estudiada en puntos no muestreados

El "jack-knifing" es un método que permite llevar a cabo esta validación (WARRICK *et al.*, 1986) y comprobar la bondad del ajuste del semivariograma teórico al experimental.

Se basa en la eliminación de cada punto muestral y su estimación por *kriging* a partir de los puntos vecinos sin tener en cuenta el valor de la variable en ese punto (GOOVAERTS, 1997; GONZÁLEZ GARCÍA, 1998; DAFONTE, 1998; VIEIRA, 2000).

Una característica de este método es que la estimación se puede hacer fácilmente con diferente número de vecinos, lo que permite analizar posteriormente cual es el número de vecinos que hacen mínimos los parámetros de validación estudiados (GONZÁLEZ GARCÍA, 1998; VIEIRA, 2000).

5.1.2.3. Kriging

El *kriging* es un término que ha sido acuñado para designar al "*mejor estimador lineal sin sesgo*" que se puede obtener en un punto y al mejor promedio lineal móvil ponderado de un bloque.

Este nombre apareció nombrar una técnica creada en Francia por MATHERON (1963) a partir de los trabajos de D. G. KRIGE quién fue probablemente el primero que hizo uso de la correlación espacial y del mejor estimador lineal sin sesgo en el campo de la evaluación de yacimientos minerales.

Kriging es la técnica de interpolación utilizada en Geoestadística. Su fortaleza estriba en el conocimiento del comportamiento de la variable en el espacio. Así, la forma del *semivariograma* nos indica la capacidad de predicción que tiene cada punto en función de la distancia que lo separa con otro punto. Los puntos más allá del rango, es decir cuando el *semivariograma* se vuelve plano, tienen la mínima capacidad de predicción. A la hora de realizar un *kriging* hay que, además de suministrar los parámetros del *semivariograma* isotrópico o los anisotrópicos, decidir la estrategia adecuada para la selección de puntos para la interpolación.

Si el número de valores en el espacio es suficiente, disminuir el radio de búsqueda de puntos puede ser la mejor estrategia, ya que evita problemas de estacionariedad, aunque hay que procurar que el radio de búsqueda no sea inferior al rango, ya que no se utilizaría toda la información que proporciona el *semivariograma*.

Otra decisión a tomar es el tipo de interpolación: puntual o por bloques. La interpolación puntual es la estima del valor de la variable en un punto del espacio, en la interpolación por bloques esta estima se corresponde con la media de un área predeterminada que rodea a ese punto. En la mayoría de los casos la interpolación por bloques (que produce un “suavizado” de las estimaciones) correlaciona mejor con los valores verdaderos, siendo generalmente más exacta que la interpolación puntual (TRANGMAR *et al.*, 1985; ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

El resultado final del *kriging* es un mapa con los valores interpolados de la variable. Este método tiene la ventaja, sobre otros métodos de interpolación, de que a cada valor interpolado se le calcula el error con que ha sido estimado, lo que da una medida de la precisión con que se hace la interpolación. Este error también se puede cartografiar, pudiéndose establecer en qué lugares son más y en cuáles menos fiables las estimaciones hechas (WEBSTER & OLIVER, 2007). Se han diseñado varios métodos para hacer el *kriging* cuya aplicación depende del tipo de datos de que se disponga (GOOVAERTS, 1998,

1999; WEBSTER & OLIVER, 2007; HENGL, 2009). DÍAZ (2002), agrupa los diferentes tipos de *kriging* de la siguiente manera:

- Con estimadores lineales: Simple, ordinario, universal, residual.
- Con estimadores no lineales: Indicador, disjunto, probabilístico.
- Paramétricos: Logarítmico, disjunto, multigaussiano.
- No paramétricos: Simple, ordinario, universal, residual, indicador, probabilístico.
- Sin estacionaridad: Universal, indicador, disjunto, probabilístico, multigaussiano.

De los anteriores tipos de *kriging*, los más utilizados con las propiedades del suelo son el ordinario, el logarítmico, el universal y el indicador. El *kriging* ordinario es el más robusto y el más utilizado para variables simples estacionarias. El logarítmico se utiliza para datos fuertemente sesgados positivamente. El universal es el indicado para trabajar con datos que no presentan estacionaridad en la media, es decir, que tienen tendencia o deriva. El indicador transforma variables continuas en binarias, unos y ceros, dependiendo de que las variables indicadoras estén por debajo o por encima, respectivamente, de un valor de corte previamente establecido (DÍAZ, 2002; WEBSTER & OLIVER, 2007).

5.1.2.4. Semivariograma cruzado y Cokriging

Hasta ahora se ha tratado de modelar la variación de un fenómeno espacial a partir de los valores de esa variable tomados del espacio. Sin embargo, es posible aprovechar la información espacial que contiene otra variable que “varíe conjuntamente” con la primera. De esta forma se puede construir un *semivariograma* en donde la varianza representada no sea entre puntos de la misma variable sino de una variable con respecto a otra. Esta representación se conoce como *semivariograma* cruzado. Si el *semivariograma* cruzado da una estructura interpretable, esta información puede usarse para la predicción de la primera variable en una técnica que se conoce como *cokriging*. La información que tiene una variable sobre otra es siempre menor que la que tiene una variable sobre sí misma. Por ello el

cokriging rara vez mejora la predicción del *kriging* (salvo que una de las dos variables haya sido muestreada con menor intensidad que la otra).

En este caso el *cokriging* puede ser muy útil. Por ejemplo, en el caso del suelo, cuando el resto de propiedades son similares (sobre todo la textura), la humedad va a depender del contenido de materia orgánica del mismo. La humedad del suelo es relativamente fácil de medir, mientras que la materia orgánica requiere de recogida de muestras de suelo y un posterior esfuerzo analítico en el laboratorio. Una estrategia (no exenta de riesgos) podría ser muestrear con menos intensidad la materia orgánica para posteriormente ayudarse de la variación espacial de la humedad del suelo utilizando el *cokriging*. La CE_a obtenida con un equipo automatizado es otra característica del suelo de la que pueden obtenerse muchas medidas y utilizarse con otras propiedades del suelo.

5.2 MATERIAL & MÉTODOS

El análisis geoestadístico y los mapas de variabilidad se llevaron a cabo mediante el uso de los paquetes geoestadísticos GSTAT 1.0-1.8 (PEBESMA & GRAELER, 2014) para R. Se llevo a cabo un análisis geoestadístico clásico, mediante el cálculo de semivariogramas y el ajuste a modelos teóricos de los mismos, seguido de la obtención de mapas por *kriging*.

Se calcularon siempre semivariogramas medios, es decir, omnidireccionales, sin tener en cuenta la dirección del vector h ; debido a no se disponen de suficientes datos para generar semivariogramas direccionales (ya que los puntos de estos semivariogramas experimentales estarían contruidos con pocos pares de datos).

Una vez que se tiene el semivariograma experimental de cada variable representado gráficamente se introducen y representan en ese mismo gráfico los modelos teóricos que se introducen mediante sus ecuaciones correspondientes (Ec. 5.3, 5.4, 5.5, 5.6). Se lleva a cabo entonces un ajuste visual (“a sentimiento”) cambiando mediante “*ensayo-error*” los diversos parámetros (C_0 , C_1 , a). Los modelos más comunes utilizados fueron el Esférico, el Exponencial y el Gaussiano. En este ajuste preliminar se tiene en cuenta el valor de la suma de cuadrados ponderados (Ec. 5.9) que se intenta minimizar para cada modelo. Después se hace una *validación cruzada* para validar los modelos elegidos.

Validación cruzada

Es una forma de comprobar el efecto de todas las decisiones tomadas en los métodos de estimación de la variable en el espacio. El método de la *validación cruzada* consiste en eliminar un valor de la variable, calcular el *semivariograma* correspondiente y estimar el valor eliminado a partir de dicho *semivariograma* (es una técnica de *jackknife*). Si esto se hace uno por uno con todos los valores de las variables, finalmente podremos representar todos los valores interpolados frente a sus valores reales (Figura 5.10). El beneficio real de una validación cruzada es el de señal de aviso. El estudio de los resultados de la validación cruzada debe concentrarse en los aspectos negativos, como en errores muy

abultados o áreas con evidente sobre o subestimación. No se debe utilizar los residuales de la validación cruzada para la mejora automática del modelo de *semivariograma*, ya que podría llevar a un modelo “mejorado” que realmente produce resultados peores. Para algunos autores es siempre preferible el ajuste de los *semivariogramas* usando información cualitativa que este tipo de ajuste automático (ISAAKS & SRIVRASTAVA, 1989).

Deben tenerse en cuenta además tres estadísticos:

- Error Medio (EM o ME):

—

- Error cuadrático medio (ECM o MSE):

—

- Error cuadrático medio adimensional (ECMA o MSDR):

— —————

Lo deseable es que el *error medio* (ME) sea cero; sin embargo el *kriging* es imparcial incluso cuando se elige un modelo inadecuado, con lo cual, el *error medio* (ME) no es de mucha ayuda. El *kriging* debe minimizar el *error cuadrático medio* (MSE), y por ello el *error cuadrático medio* (MSE) es mejor indicador, aunque no será útil para elegir un modelo

“correcto”, por lo general un modelo de semivariograma se considera adecuado si el MSE es menor que la varianza de los valores muestrales (HEVESI *et al.*, 1992). El estadístico más útil de los tres es el *error cuadrático medio adimensional* (MSDR); debe ser igual a 1, así el *kriging* podría elegir el modelo cuyo *error cuadrático medio adimensional* (MSDR) esté más cercano a 1 (OLIVER y WEBSTER, 2014). Además debe cumplirse que la varianza de los errores de estimación debe ser \leq que la varianza muestral (SAMPER & CARRERA, 1990).

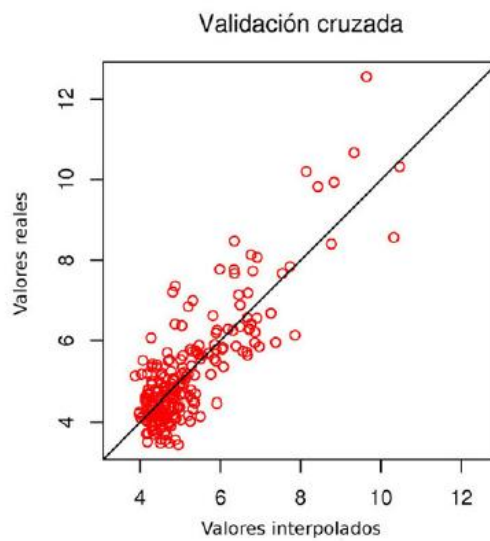


Figura 5.10. Relación entre los valores observados y los interpolados utilizando validación cruzada (Según GALLARDO, 2006).

Kriging puntual: Kriging ordinario

Teniendo en cuenta las condiciones del estimador (linealidad, sesgo nulo y varianza mínima) para calcular un valor interpolado hay que resolver un sistema de ecuaciones lineales conocidas como ecuaciones de *kriging*, su deducción lo detalló VIEIRA (2000):

$$\begin{aligned} \sum_i \lambda_i \gamma(x_i - x_j) + \mu &= \gamma(x_i - x) \quad i = 1 \dots n \\ \sum_j \lambda_j &= 1 \end{aligned} \tag{5.14}$$

Se pueden escribir en forma matricial:

$$\begin{pmatrix} 0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \dots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & 0 & \gamma_{23} & \dots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_n \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

Donde $\gamma_{ij} = \gamma(x_i, x_j)$ es la semivarianza estimada usando el modelo teórico de semivariograma ajustado a los valores experimentales, que corresponde a la distancia entre los puntos localizados en la posición x_i y x_j ; $\gamma(x_i, x_0)$ es la semivarianza correspondiente a la distancia entre los puntos localizados en la posición x_i y x_0 . La solución del sistema de ecuaciones de *kriging* (5.15) genera N valores de pesos λ y un valor del multiplicador de Lagrange, μ , asociado al proceso de minimización de la varianza. Sustituyendo los valores de los pesos, λ_i , en la ecuación de *kriging* puntual (5.16), es posible estimar los valores en cualquier posición, x_0 , del espacio muestreado.

La formulación más común del método del *kriging* es la del ordinario porque vale para variables estacionarias e intrínsecas (SAMPER & CARRERA, 1990). La estimación de una variable Z en un punto x_0 donde no hay medida debe de ser una *combinación lineal* de los valores medidos:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (5.16)$$

donde $Z^*(x_0)$ es el valor estimado en el punto x_0 , $Z(x_i)$ son los valores de la variable en los N puntos donde son conocidos y los λ_i se denominan coeficientes de *kriging* o pesos asociados a cada valor medido.

La utilización de los valores insesgados y con varianza mínima, obtenidos por *kriging* permite construir mapas de isolíneas o mapas tridimensionales para el examen y la interpretación de la variabilidad.

Como ya se dijo el *kriging* permite calcular la varianza del error de estimación (que en el caso de un punto muestreado tiene que ser 0) con la expresión:

$$\sigma_k^2(x_0) = \sum_i \lambda_i \gamma(x_i - x_j) + \mu \quad (5.17)$$

Es de señalar que las ecuaciones de *kriging* no dependen de valores experimentales de las variables sino solamente de su posición en el espacio y del modelo de dependencia espacial ajustado mediante un semivariograma $\gamma(h)$. Por otra parte, la varianza del error de estimación sólo depende del semivariograma teórico, $\gamma(h)$, y de los coeficientes de ponderación, pero no depende de los valores medidos.

La estimación por *kriging* tiende al valor verdadero bajo condiciones muy generales al aumentar el número de datos; respecto a la varianza de estimación no es lo mismo, el error en el cálculo de ésta queda acotado por el error cometido al estimar el semivariograma (SAMPER & CARRERA, 1990).

5.3 RESULTADOS & DISCUSIÓN

5.3.1 Variabilidad espacial de las propiedades generales

5.3.1.1 Profundidad de muestreo 0-20 cm

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados del análisis estructural de las propiedades estudiadas, además se muestra los valores de los parámetros de dichos modelos teóricos (efecto pepita, meseta, alcance y proporción efecto pepita – meseta) y de los principales estadísticos obtenidos por validación cruzada (EM, ECM, ECMA)

Variable	Modelo	Efecto Pepita	Meseta	Alcance	(C_0/C_0+C)	EM	ECM	ECMA
		C_0	C_0+C	a_0 (m)				
MO	Esférico		35	62	0	-0.4075	21.80	1.0090
pH	Esférico	0.0155	0.038	80	0.408	0.0018	0.0305	1.0059
Ca	Exponencial	17.5	30.5	30	0.573	0.1123	29.82	1.0502
P	Esférico	10	252	41	0.04	-0.0959	227.24	0.9902
Mg	Pepita puro							
K	Pepita puro							
Al	Exponencial	1	10	16.5	0.10	-0.0990	9.22	1.0042
H+Al	Pepita puro							
SB	Exponencial	18	32	20	0.562	0.1062	31.37	1.0022
CIC	Pepita puro							
V	Pepita puro							
Arcilla	Esférico	2	9	130	0.222	0.0494	4.61	1.0076
Limo	Exponencial	0.01	18.23	37.34	0.0005	-0.1407	10.5689	1.0017
Arena	Esférico	5	45	111	0.111	0.0821	19.87	1.0025

Tabla 5.1. Modelos ajustados, parámetros del semivariograma y estadísticos obtenidos por validación cruzada (EM=error medio; ECM=error cuadrático medio; ECMA=error cuadrático medio adimensional).

La MO, el pH, la textura, el P extraído con resina, y algunas propiedades del complejo de cambio (SB, Ca y Al) presentan dependencia espacial. Otras propiedades del complejo de cambio como CIC, V, Mg, K y H+Al, no presentaron dependencia espacial. La dependencia espacial de MO, pH, textura, P, SB, Ca y Al pudo describirse mediante

modelos Esféricos o Exponenciales; todos ellos con efecto pepita salvo para el caso de la MO. El modelo Esférico que se pudo ajustar a la mayoría de propiedades (salvo MO y SB), es un modelo que se ha empleado para describir la variabilidad espacial de las propiedades del suelo en Galicia, por lo que los resultados de este trabajo son coincidentes con lo que han descrito otros autores (PAZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2000; ULLOA GUITIÁN, 2002; SIQUEIRA, 2009).

El alcance de las variables analizadas fluctuó entre 16.5 m para el Al y 130 m para la arcilla. ULLOA GUITIÁN (2002) contrariamente a los resultados de esta tesis, no encontró dependencia espacial en la MO, al tiempo que se puso de manifiesto que los alcances de las fracciones granulométricas son superiores a las de este estudio; estas diferencias pueden ser debidas al hecho que el estudio de dicha autora se efectuó sobre suelos desarrollados sobre esquistos de órdenes y en esta tesis el suelo está sobre sedimentos terciarios y cuaternarios. Al comprobar los resultados con los de SIQUEIRA (2009) en la misma zona de estudio (también el sobre sedimentos terciarios y cuaternarios), se observa que la MO si presentó dependencia espacial, con mayor alcance.

De acuerdo con CAMBARDELLA *et al.* (1994) la dependencia espacial puede considerarse débil, moderada y fuerte; para valores de $C_0/C_0+C >0.75$, $0.25-0.75$ y < 0.25 , respectivamente. La dependencia espacial es fuerte para el caso de la MO, P, Al, arcilla y arena, dado que la proporción C_0/C_0+C es menor a 0.25 mientras que para el caso de el pH, Ca y SB la dependencia espacial se considera moderada.

En cuanto a los ajustes de los modelos teóricos y en función del ECMA todos los elementos presentan valores muy cercanos a 1, siendo la MO es la propiedad estudiada que presenta un mejor ajuste con un valor de 1.0090 y el Ca el peor con un ECMA de 1.0502.

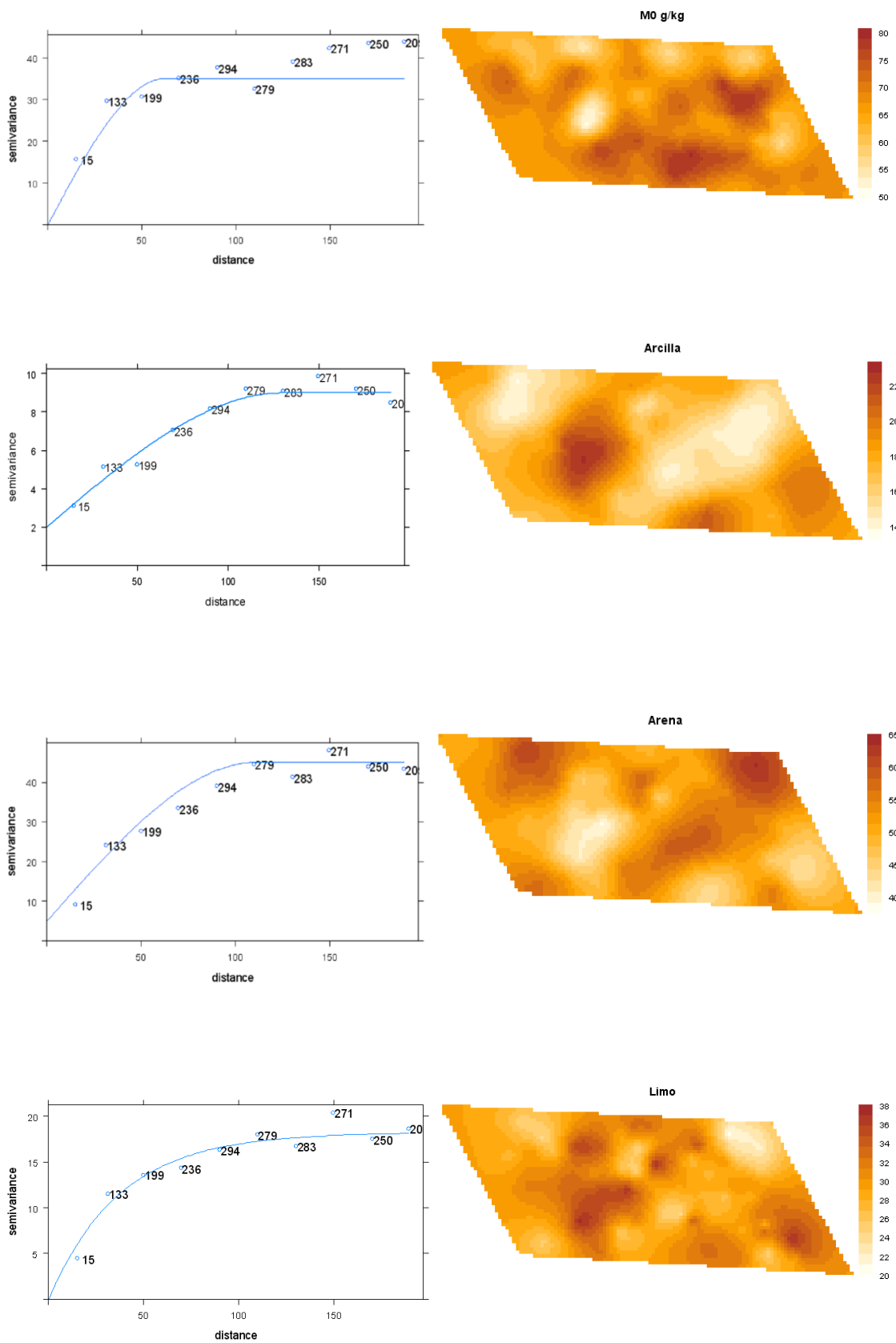


Figura 5.11. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de MO, arcilla, arena y limo.

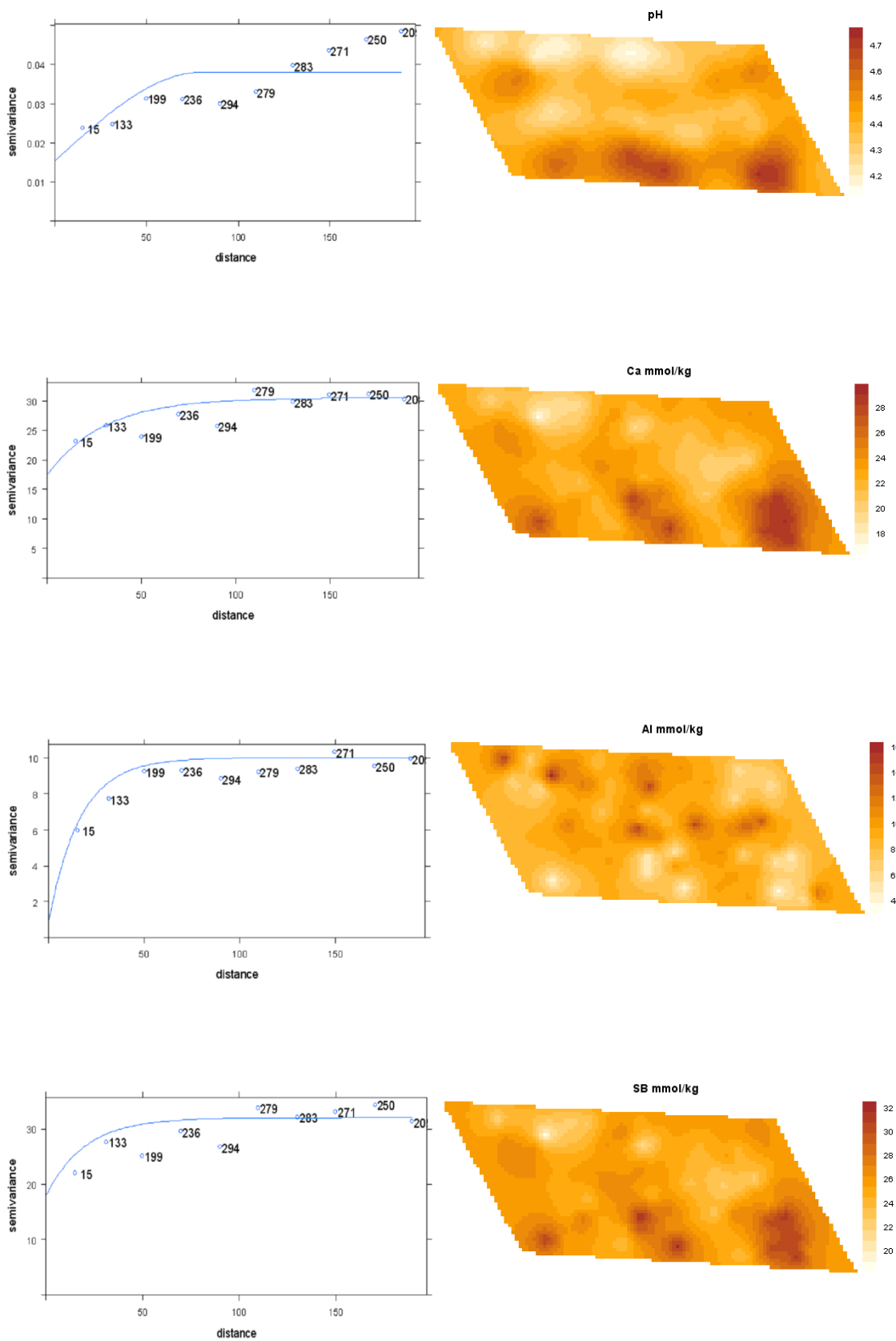


Figura 5.12. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de pH, Ca, Al y SB.

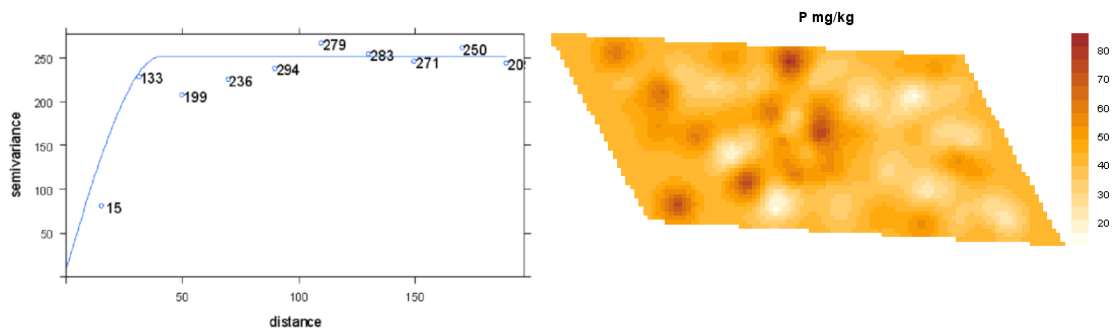


Figura 5.13. *Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de P.*

En las Figuras 5.11, 5.12 y 5.13 se muestran los semivariogramas y los mapas de *kriging* de las propiedades generales que presentan dependencia espacial. Atendiendo al mapa de *kriging* de la MO se observa que las mayores concentraciones de la misma se sitúan en las partes más altas de las parcela; este resultado concuerda con lo puesto de manifiesto en el análisis de componentes principales (Tabla 3.5).

Las mayores concentraciones de arcilla aparecen en la zona Oeste de la parcela coincidiendo con una depresión ocupada por una “laguna” local en los meses de invierno, mientras que las menores se sitúan en una franja en la zona Este, coincidiendo en parte con la zona más alta de la parcela. Está establecido que la pérdida de arcilla generalmente se produce en la parte más alta y se depositan en las zonas bajas (REY & OVALLES, 2001). Sin embargo, la distribución espacial de la arcilla en la parcela estudiada no puede atribuirse exclusivamente a fenómenos de erosión o de posición y puede estar en relación con la distribución espacial del material de partida. En general la MO tiende a agruparse en aquellas zonas donde existe un menor contenido en arcilla, lo que concuerda con la correlación lineal entre estas variables (Tabla 3.4). Por otro lado la cantidad relativamente baja de MO en las zonas con mayor hidromorfía; la ocupada por la “laguna”, es un resultado inesperado. En el área ocupada por la “laguna” se efectuaron movimientos

locales de tierra con el fin de crear una canal de drenaje (que se mostró poco operativo); como hipótesis de trabajo se puede asumir que dichos movimientos pudieron provocar pérdida de MO. La arena como era esperado se comporta de forma inversa a la arcilla.

Los mapas de *kriging* del pH, del Ca y de la SB son similares (en el caso del Ca y la SB prácticamente idénticos); acumulándose las mayores cantidades de Ca, SB y los mayores valores de pH en la parte Sur-Sureste de la parcela. El mapa del Al obtenido es inverso a los anteriores, en la zona Sur-Sureste las cantidades de Al son las más bajas. Este modelo de distribución espacial es consistente dado las correlaciones lineales obtenidas y el estudio de componentes principales de las propiedades generales (CPG₁).

Por su parte el P, muestra menores concentraciones en las zonas de mayor altitud de la parcela, acumulándose las mayores cantidades en las pequeñas hondonadas o depresiones. Esto ha podido ser provocado por el laboreo realizado en la parcela cuando hubo cereal, lo cual produce fenómenos localizados de erosión haciendo que el P se acumule en las microdepresiones.

5.3.1.2 Profundidad de muestreo >20 cm

En la Tabla 5.2 se muestran los resultados del análisis estructural de las propiedades estudiadas a profundidad >20 cm. A diferencia de lo que ocurría en los primeros 20 cm de suelo todas las propiedades estudiadas presentan dependencia espacial, salvo en el caso de las fracciones granulométricas, ni el limo ni la arena son dependientes espacialmente (sí lo eran en la profundidad 0-20 cm). Los modelos Esférico (que aparece en 7 propiedades), Exponencial (3 veces) y Gaussiano (2 veces) son los que mejor ajuste muestran. Dichos ajustes siempre presentan efecto pepita.

Variable	Modelo	Efecto Pepita	Meseta	Alcance	(C_0/C_0+C)	EM	ECM	ECMA
		C_0	C_0+C	$a_0(m)$				
MO	Esférico	24.45	70.45	165	0.347	-0.1781	39.4265	0.9902
pH	Esférico	0.013	0.0387	130	0.336	0.0050	0.0303	1.2856
Ca	Exponencial	20	70	35	0.286	0.3820	66.3869	1.2110
P	Exponencial	2	76	27	0.026	0.0358	53.6593	1.0009
Mg	Esférico	0.23	0.41	113.04	0.561	-0.0061	0.3231	0.9937
K	Gaussiano	0.05	0.099	90	0.505	0.0047	0.0603	1.0067
Al	Exponencial	2	11.66	20	0.172	-0.1501	10.3541	1.0145
H+Al	Esférico	200	385	120	0.519	0.2580	329.0284	1.0934
SB	Esférico	25	67	120	0.373	0.3636	62.0954	1.3590
CIC	Gaussiano	220	410	93	0.537	0.4290	280.2981	1.0529
V	Esférico	10	65	45	0.154	0.5974	74.0968	1.2198
Arcilla	Esférico	6.23	7.04	107.76	0.885	0.0533	6.8271	0.9768
Limo	Pepita puro							
Arena	Pepita puro							

Tabla 5.2. Modelos ajustados, parámetros del semivariograma y estadísticos obtenidos por validación cruzada (EM=error medio; ECM=error cuadrático medio; ECMA=error cuadrático medio adimensional).

El alcance para las variables analizadas se sitúa en un intervalo de 20 m (del Al) a 165 m (de la MO). En el estudio de las propiedades generales, el alcance a >20 cm es mayor que a profundidad 0-20 cm, salvo para el caso del P y la arcilla.

La dependencia espacial es fuerte para el caso de la P, Al y V con proporción C_0/C_0+C menor a 0.25 mientras que es moderada para las variables: MO, pH, Ca, Mg, K, H+Al, SB y CIC, situándose entre 0.25-0.75 y es débil en el caso de la arcilla, dado que su C_0/C_0+C es mayor a 0.75. En cuanto a los ajustes de los modelos teóricos y en función del ECMA; el mejor ajuste es el del P (ECMA =1.0009) y el de peor ajuste la SB (ECMA = 1.359).

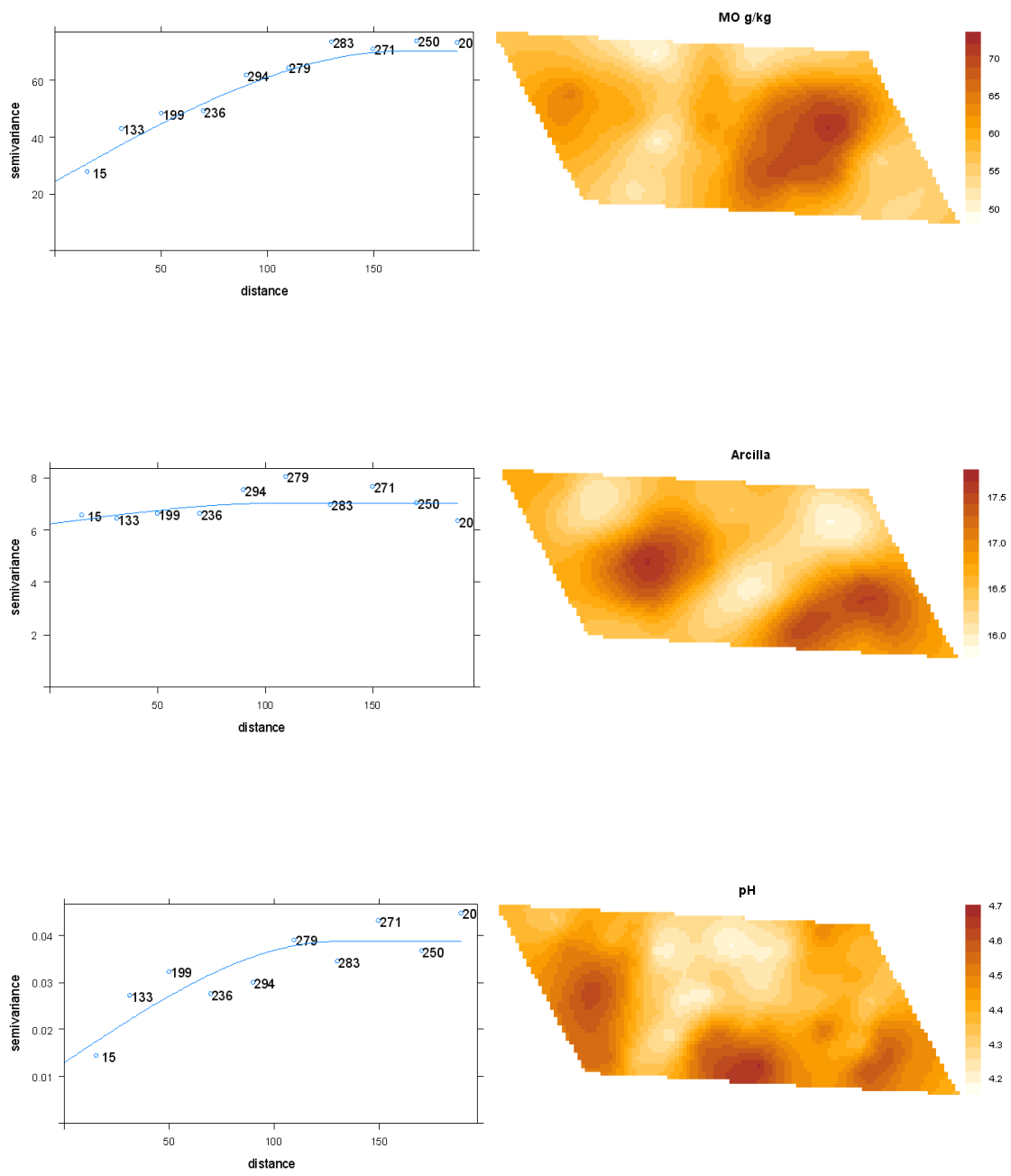


Figura 5.14. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de MO, arcilla y pH.

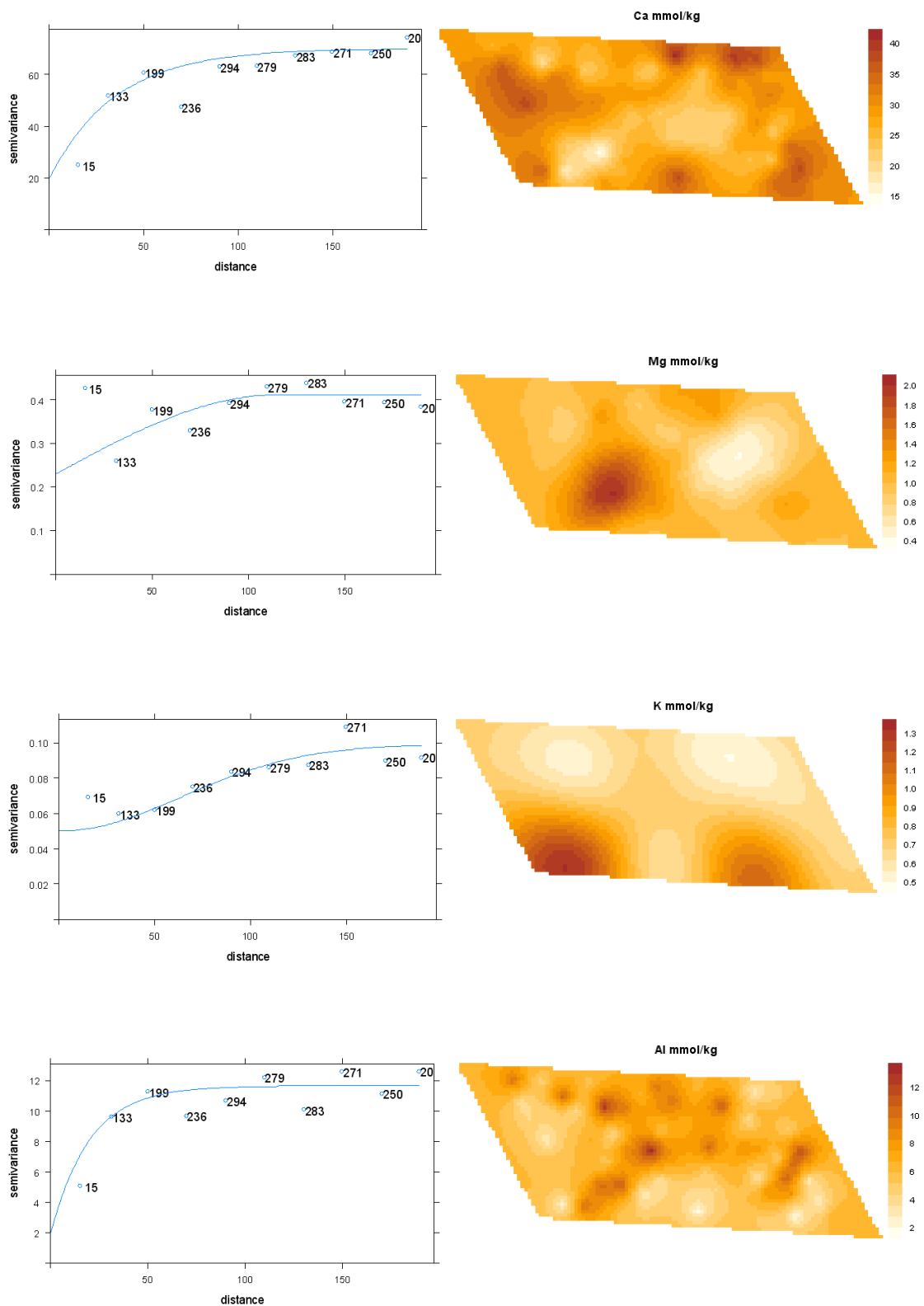


Figura 5.15. Semivariogramas y mapas de *kriging* ordinario de Ca, Mg, K y Al.

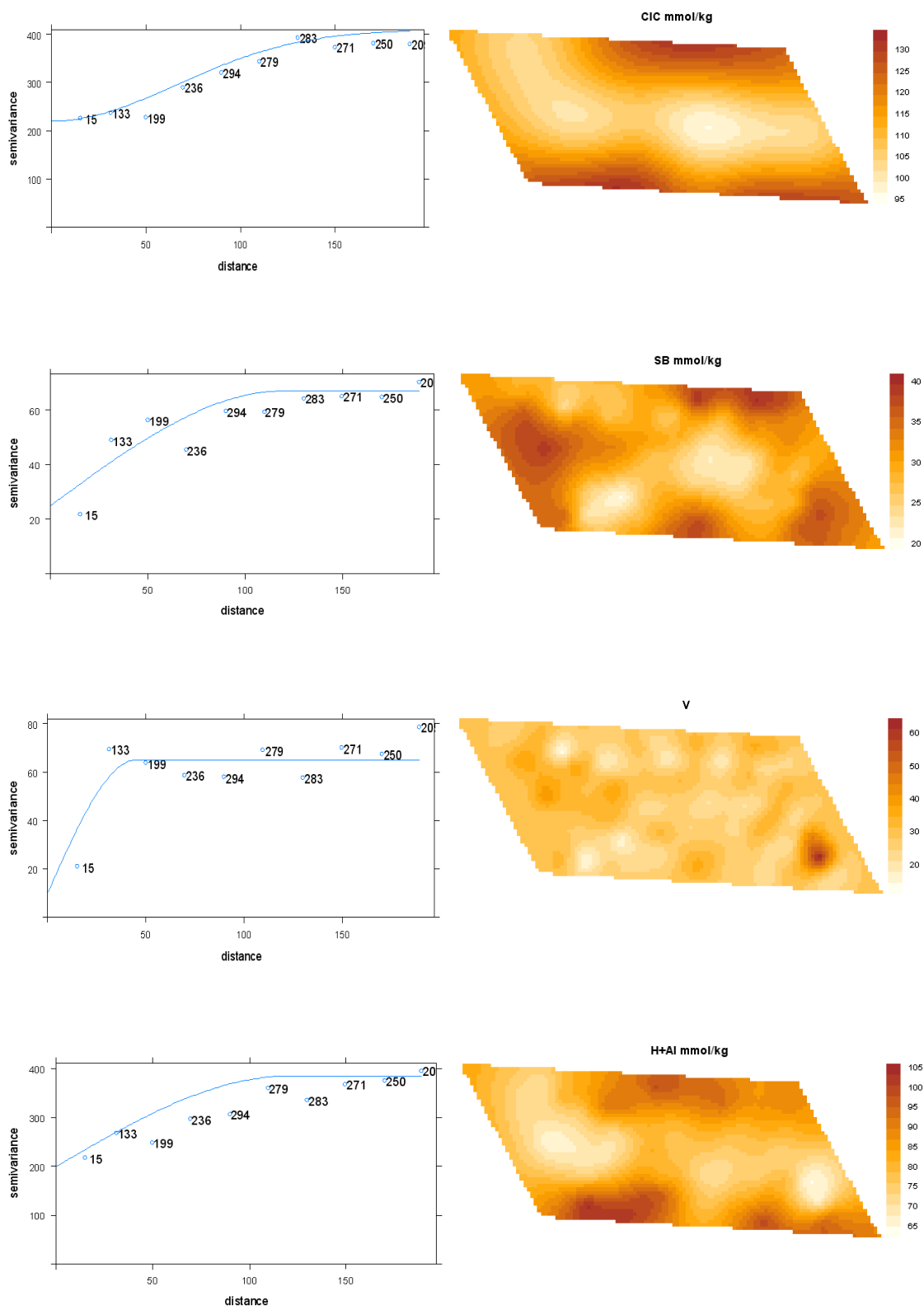


Figura 5.16. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de CIC, SB, V y H+Al.

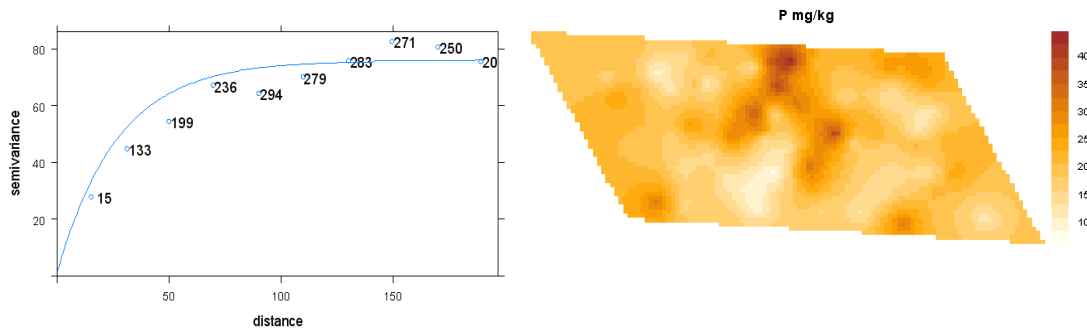


Figura 5.17. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de P.

En las Figuras 5.14, 5.15, 5.16 y 5.17 se muestran los semivariogramas y los mapas de *kriging* de las propiedades generales que presentan dependencia espacial. El mapa de *kriging* de la MO es algo diferente al obtenido en la profundidad 0-20 cm, si bien las mayores concentraciones se sitúan en la parte Este de la parcela coincidiendo en parte con las zonas más altas de la misma, dado que en la esquina Sureste (coincidiendo en parte con la “laguna”) y Suroeste las concentraciones de MO son bajas.

El mapa de *kriging* de la arcilla es similar al que se obtenía en la profundidad 0-20 cm, si bien aparece en la esquina Sureste una zona de acumulación mayor (inversamente a la MO). Lo cual pone de manifiesto la relación negativa entre ambas variables.

Los mapas de *kriging* del pH, de la SB y de Ca son similares acumulándose las mayores cantidades de SB y los mayores valores de pH en la parte Sur-Suroeste de la parcela (esto último no ocurría en la profundidad 0-20 cm), si bien el mapa de Ca no es tan similar a los anteriores como en los 20 primeros cm de suelo. El mapa del Al obtenido es inverso a los anteriores, en la zona Sur-Sureste, y Oeste las cantidades de Al son las más bajas. Eso era lo esperado dadas las correlaciones lineales obtenidas y el estudio de

componentes principales de las propiedades generales. El Mg muestra se comporta inversamente a la MO, y sus concentraciones son menores en las partes más bajas de la parcela; ambas relaciones aparecían en el estudio de componentes principales para esta profundidad (CPG₄). El K se mantiene constante en la mayor parte de la parcela a bajas concentraciones y se acumula en la esquina Suroeste y en menor medida en una zona de la zona Sur. Los mapas de la CIC y la H+Al son similares (lo que está de acuerdo con la alta correlación lineal entre los mismos); estando los mayores valores en los bordes Norte y Sur de la parcela, y más bajos en la zona central. El V presenta una distribución irregular lo que puede ser debido al alcance relativamente bajo de dicha variable. El P, muestra un comportamiento similar al de la profundidad 0-20 cm acumulándose en las microdepresiones de la parcela, con menores concentraciones de P en las zonas altas de la parcela.

5.3.1.3 Horizonte A

En la Tabla 5.3 se muestran los resultados del análisis estructural de las propiedades estudiadas y además la CE_aV y CE_aH. La MO, pH, fracciones granulométricas, Ca, P, Al, SB, V, CE_aV y CE_aH mostraron dependencia espacial; los modelos Esférico y Exponencial fueron los de mejor ajuste. El Mg, K, H+Al y CIC no presentaron dependencia espacial mientras.

El alcance para las variables analizadas fluctuó entre 13.6 m para el V y 128 m en el caso de la arcilla. La dependencia espacial es fuerte en el caso de la MO, pH, P, arcilla y arena, dado su dependencia espacial es menor a 0.25 y por otro lado el Ca, Al, SB y V la dependencia espacial fue moderada; situándose entre 0.25-0.75.

Variable	Modelo	Efecto Pepita	Meseta	Alcance	C_0/C_0+C	EM	ECM	ECMA
		C_0	C_0+C	$a_0(m)$				
MO	Esférico		38	59	0	-0.5237	24.8389	1.0075
pH	Esférico	0.005	0.025	52	0.20	0.0080	0.0214	1.0000
Ca	Exponencial	18	35.5	28	0.507	0.2647	36.7555	1.1215
P	Esférico		235	83	0	0.3757	111.1651	1.0098
Mg	Pepita puro							
K	Pepita puro							
Al	Exponencial	2.2	8.45		0.26	-0.0990	9.2296	1.0042
H+Al	Pepita puro							
SB	Exponencial	12	35	17.3	0.343	0.3145	36.1727	1.0733
CIC	Pepita puro							
V	Exponencial	11	28	13.6	0.393	0.3173	30.0847	1.0805
Arcilla	Esférico	1.5	9.25	128	0.163	0.0200	4.1614	1.0039
Limo	Exponencial	0.01	14.21	19.81	0.0007	-0.1015	11.5853	1.0053
Arena	Esférico	1	35	64	0.29	0.1030	21.7994	0.9950
CE _{a-v}	Esférico	0.01	3.01	97	0.003	0.0884	1.0739	1.0098
CE _{a-H}	Esférico	0.05	0.60	78	0.083	0.0382	0.3388	1.0085

Tabla 5.3. Modelos ajustados, parámetros del semivariograma y estadísticos obtenidos por validación cruzada (EM=error medio; ECM=error cuadrático medio; ECMA=error cuadrático medio adimensional).

Se han incluido en la profundidad ponderada las variables de conductividad eléctrica (en el dipolo vertical y en el dipolo horizontal), ambas presentan dependencia espacial siendo el modelo de ajuste el Esférico con efecto pepita pequeño, coincidiendo con lo encontrado por SIQUEIRA (2009), en otro suelo en la misma zona; siendo el alcance de 97 m en el caso de la medida de la CE_{aV} y 78 m en el caso de la CE_{aH}. Atendiendo a la proporción C_0/C_0+C en ambos casos la dependencia espacial es fuerte (<0.25). Los ECMA de ambas propiedades son muy próximas a 1 (1.0098 para la CE_{aV} y 1.0085 para la CE_{aH}), con lo cual los ajustes son adecuados.

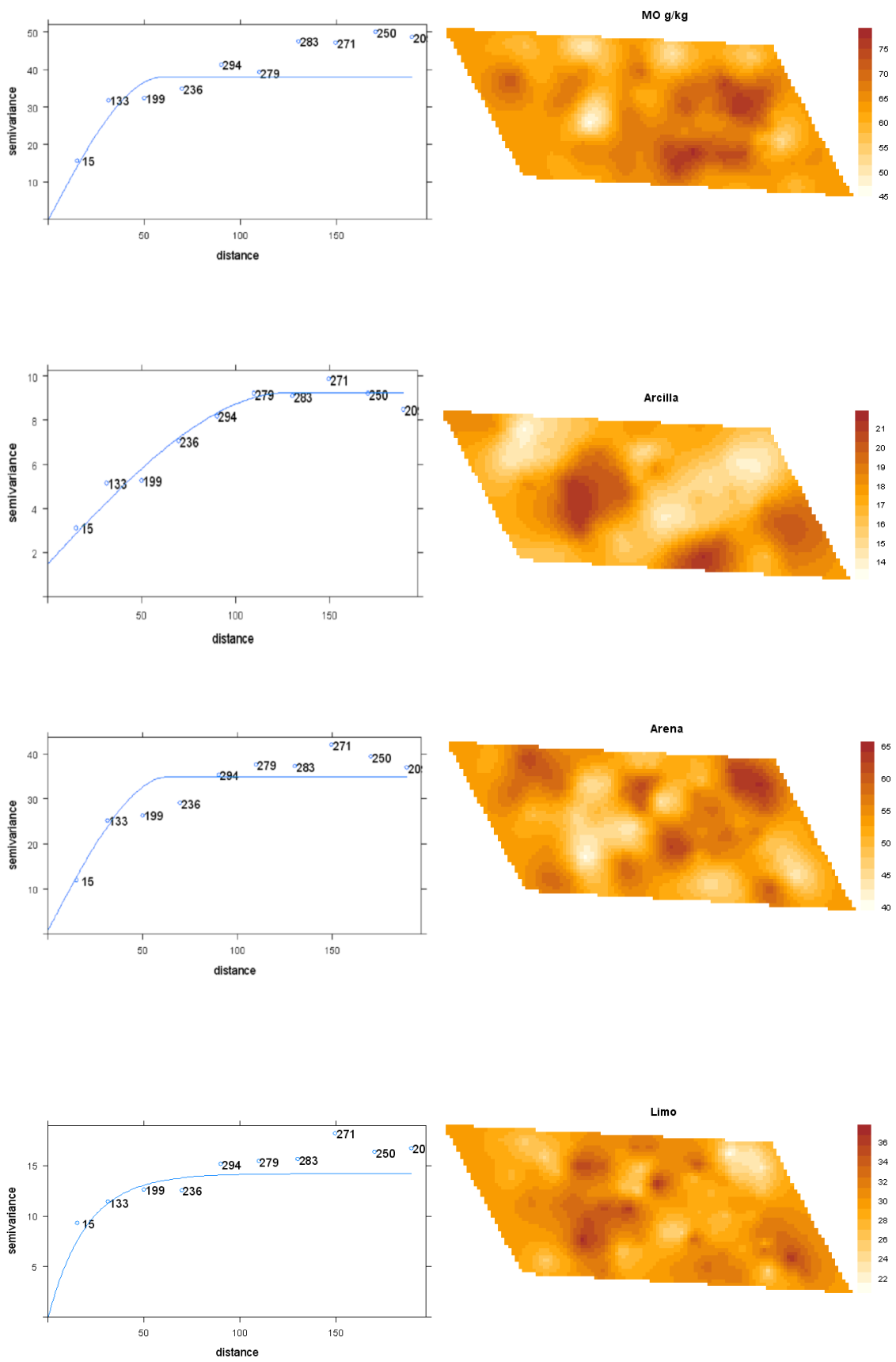


Figura 5.18. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de MO, arcilla, arena y limo.

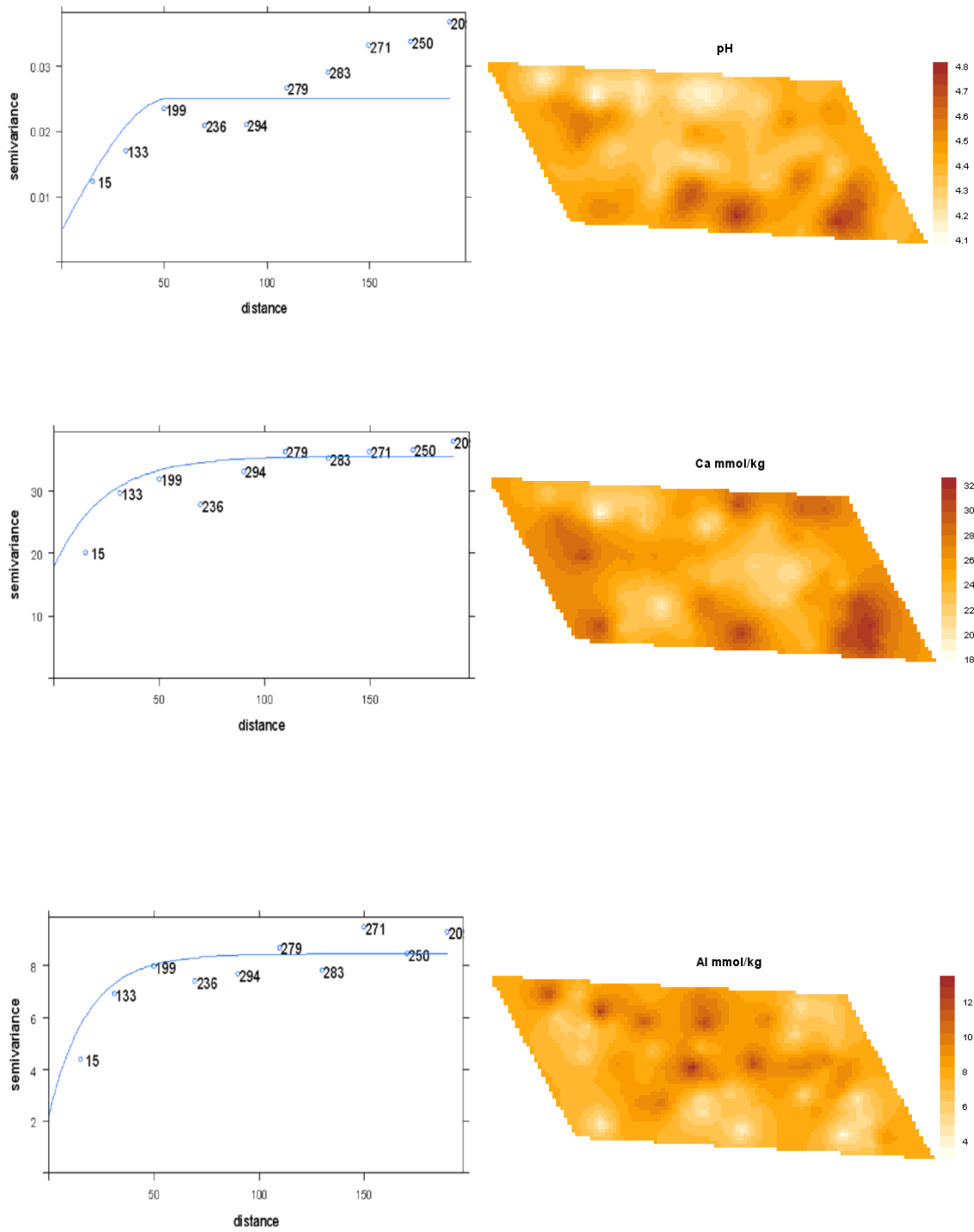


Figura 5.19. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de pH, Ca y Al.

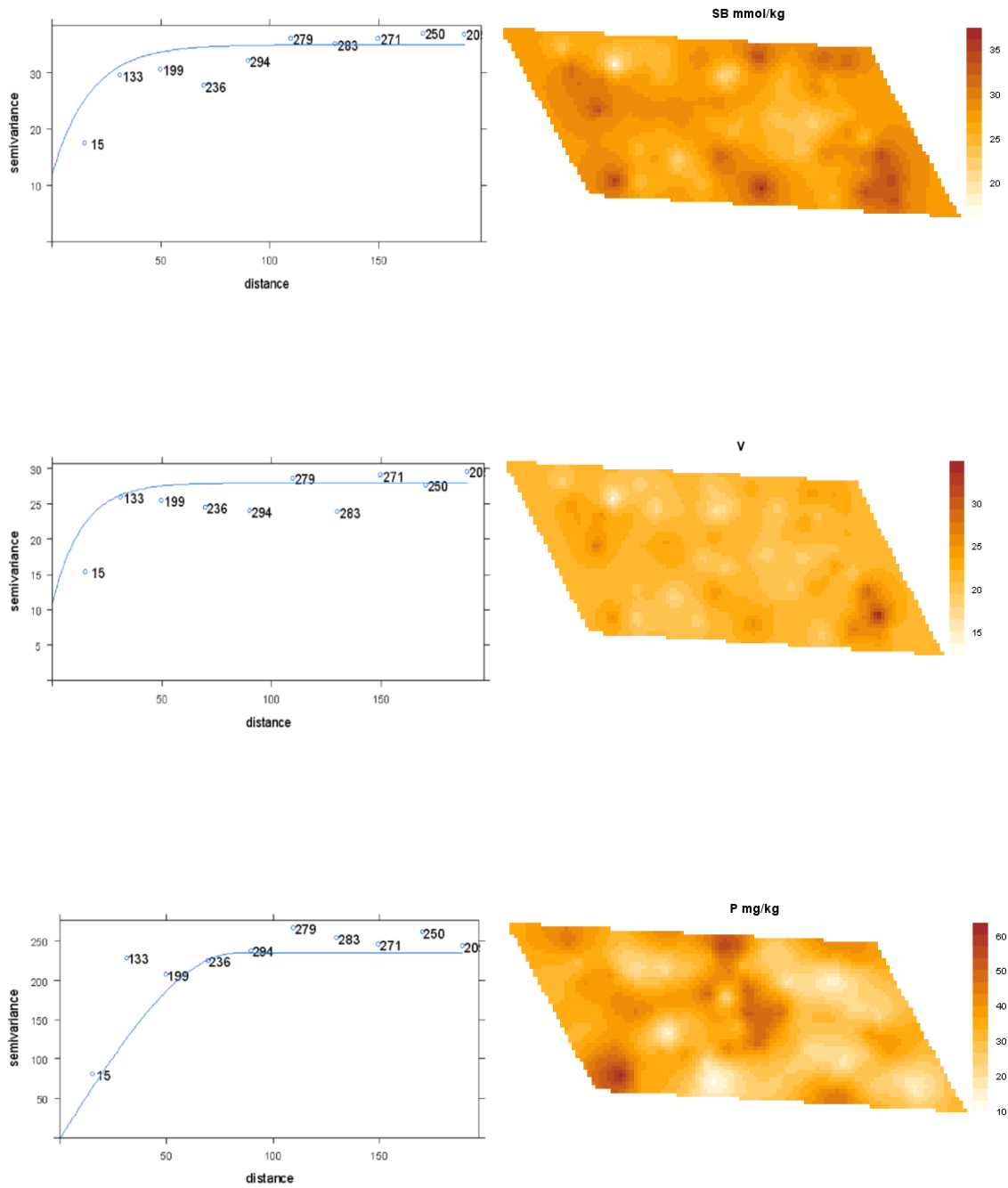


Figura 5.20. *Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de SB, V y P.*

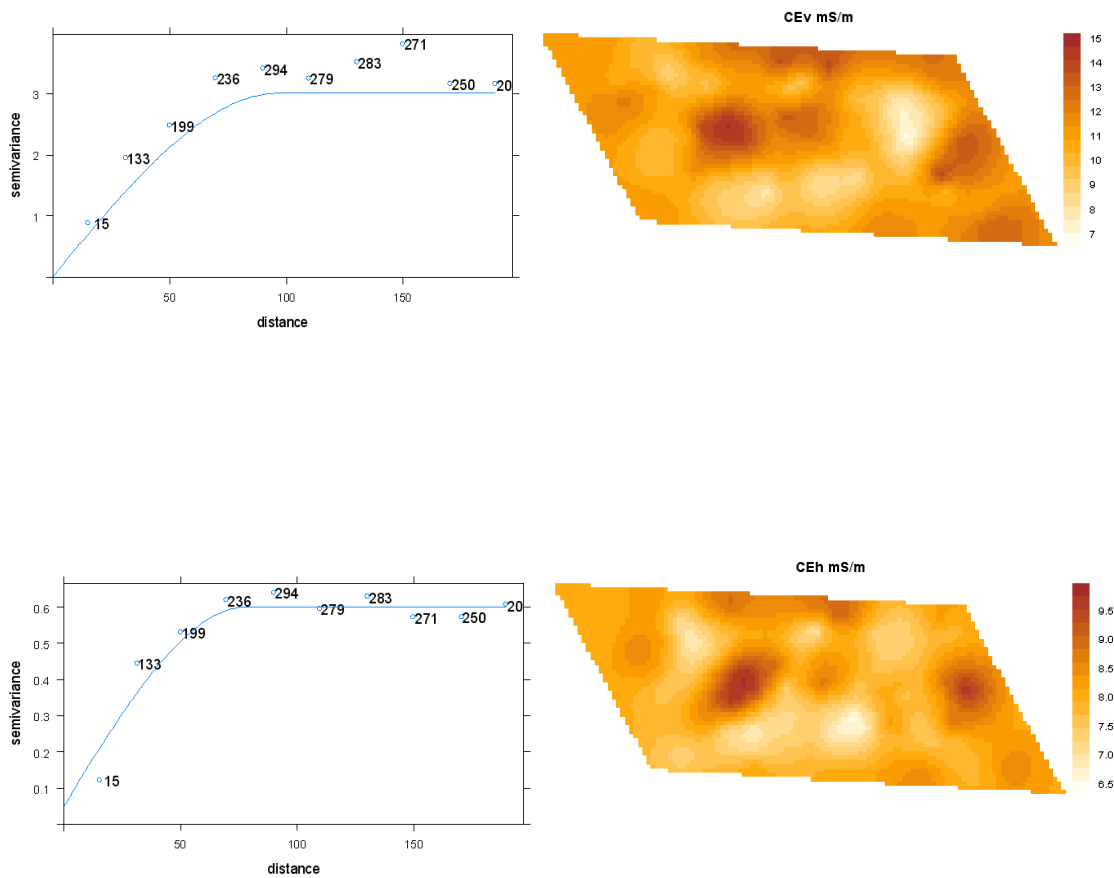


Figura 5.21. Semivariogramas y mapas de *kriging* ordinario de suma de la conductividad eléctrica aparente vertical (CE_v) y la conductividad eléctrica aparente horizontal (CE_h)

Las Figuras 5.18, 5.19, 5.20 y 5.21 muestran los semivariogramas y los mapas de *kriging* de las propiedades generales que presentan dependencia espacial. El mapa de *kriging* de la MO es más similar al obtenido para 0-20 cm que para >20 cm; apareciendo las mayores concentraciones en la parte Este de la parcela coincidiendo en parte con las zonas más altas (algo que concuerda con el análisis de componentes principales a profundidad ponderada; donde el CPG_4 ; en el cual la MO destaca se correlaciona positivamente con la altura). El mapa de *kriging* de la arcilla es similar al que se obtenía en la profundidad 0-20 cm y >20 cm. La arena muestra un semivariograma y mapa de *kriging* muy similar al de la

profundidad 0-20 cm (en la profundidad >20 cm no presentaba dependencia espacial), con menor efecto pepita (1 frente a 5) y menor alcance (64 m por 111 m).

El mapa de *kriging* de pH es más similar al obtenido en los primeros 20 cm de suelo, situándose los mayores valores en la zona Sureste; como se esperaba el Ca y SB se comportan de forma similar y por el contrario el mapa del Al obtenido es inverso a los anteriores (en la zona Sur-Sureste, y Oeste las cantidades de Al son las más bajas). El V muestra un mapa de *kriging* similar al calculado para la profundidad >20 cm (en los primeros 20 cm de suelo no presentaba dependencias espacial), si bien los modelos de ajuste del semivariograma son diferentes, Esférico en la profundidad >20 cm y Exponencial en el caso de todo el Horizonte A. El P, muestra un comportamiento similar al de las profundidades anteriores acumulándose en las microdepresiones de la parcela, con menores concentraciones de P en las zonas altas de la parcela. Los mapas de *kriging* de las CE_aH y CE_aV muestran coincidencias, los valores más altos de obtuvieron en la parte central de la parcela, y en la zona Norte. Ambos presentan ciertas similitudes con el mapa de *kriging* de la arcilla. No muestran relación con la topografía de la parcela; la CE_a es un parámetro que no se ve influenciado significativamente por la topografía del lugar estudiado, es un método que por tanto permite evaluar las condiciones de suelo con cualquier característica topográfica (GALEA *et al.*, 2013).

5.3.2 Variabilidad espacial de las propiedades químicas

5.3.2.1 Profundidad de muestreo 0-20 cm (Mehlich-3)

En la Tabla 5.4 se muestra el análisis estructural de los 11 elementos extraídos mediante el reactivo Mehlich-3. Únicamente el Pb no presenta dependencia espacial; el resto de los elementos se ajustan a dos tipos de modelos teóricos, 8 Exponenciales y 2 Esféricos. Otros autores encontraron estos modelos para macronutrientes ULLOA GUTIÁN (2002), metales pesados YANG *et al.* (2014), para micronutrientes DAFONTE *et al.* (2010). En este último obtuvieron un modelo Exponencial para el Zn y modelos Gaussianos para el Cu, Fe y Mn. En los semivariogramas ajustados para todos los elementos tienen efecto pepita salvo los elementos K y Cd.

Variable	Modelo	Efecto Pepita	Meseta	Alcance	(C_0/C_0+C)	EM	ECM	ECMA
		C_0	C_0+C	$a_0(m)$				
Ca	Esférico	14400	34400	125.44	0.419	7.2754	24258.17	1.0010
P	Esférico	125	2325	50	0.054	0.9693	1859.92	1.0098
K	Exponencial	0	780	30	0	0.7014	510.75	0.9978
Fe	Exponencial	50	2650	19	0.019	0.1398	2256.45	1.0164
Mn	Exponencial	0.25	0.545	35	0.459	0.0023	0.4686	1.0034
Cu	Exponencial	0.00081	0.00401	20	0.202	0.0023	0.0038	1.0138
Zn	Exponencial	0.04	0.12	18	0.333	0.0089	0.1133	1.0030
Cd	Exponencial	0	0.00020	43.94	0	0.0003	0.0001	1.0069
Cr	Exponencial	0.002	0.0093	14.69	0.215	0.0039	0.0090	1.0032
Ni	Exponencial	0.0007	0.0044	40	0.159	0.0025	0.0031	1.0179
Pb	Pepita puro							

Tabla 5.4. Modelos ajustados, parámetros del semivariograma y estadísticos obtenidos por validación cruzada (EM=error medio; ECM=error cuadrático medio; ECMA=error cuadrático medio adimensional).

El alcance oscila entre 18-125 m; ligeramente inferiores a los encontrados por ULLOA GUTTIÁN (2002) con elementos extraídos mediante Mehlich-3.

La relación entre el efecto pepita y la meseta oscila entre 0 y 0.49, por lo que de acuerdo con CAMBARDELLA *et al.* (1994) el grado de dependencia espacial es alto no sólo para K y Cd, sino para P, Fe, Cu, Cr y Ni; siendo media para Ca, Mn y Zn.

Los modelos elegidos pueden considerarse adecuados para discutir la variabilidad espacial, dado que los valores de ECMA de todos los elementos son muy próximos a 1; siendo el K el de mejor ajuste (ECMA=0.9978) y el Ni el de peor (ECMA=1.0179).

Los alcances de Ca, P y K extraídos mediante Mehlich-3 son mayores a los que se obtenían en la extracción de estos elementos por resina; siendo mayor el grado de dependencia espacial en el caso del Ca y K (dado que no presentaba dependencia espacial en la extracción mediante resina) y el P por el contrario es tiene un grado de dependencia espacial ligeramente menor (0.054 frente a 0.04).

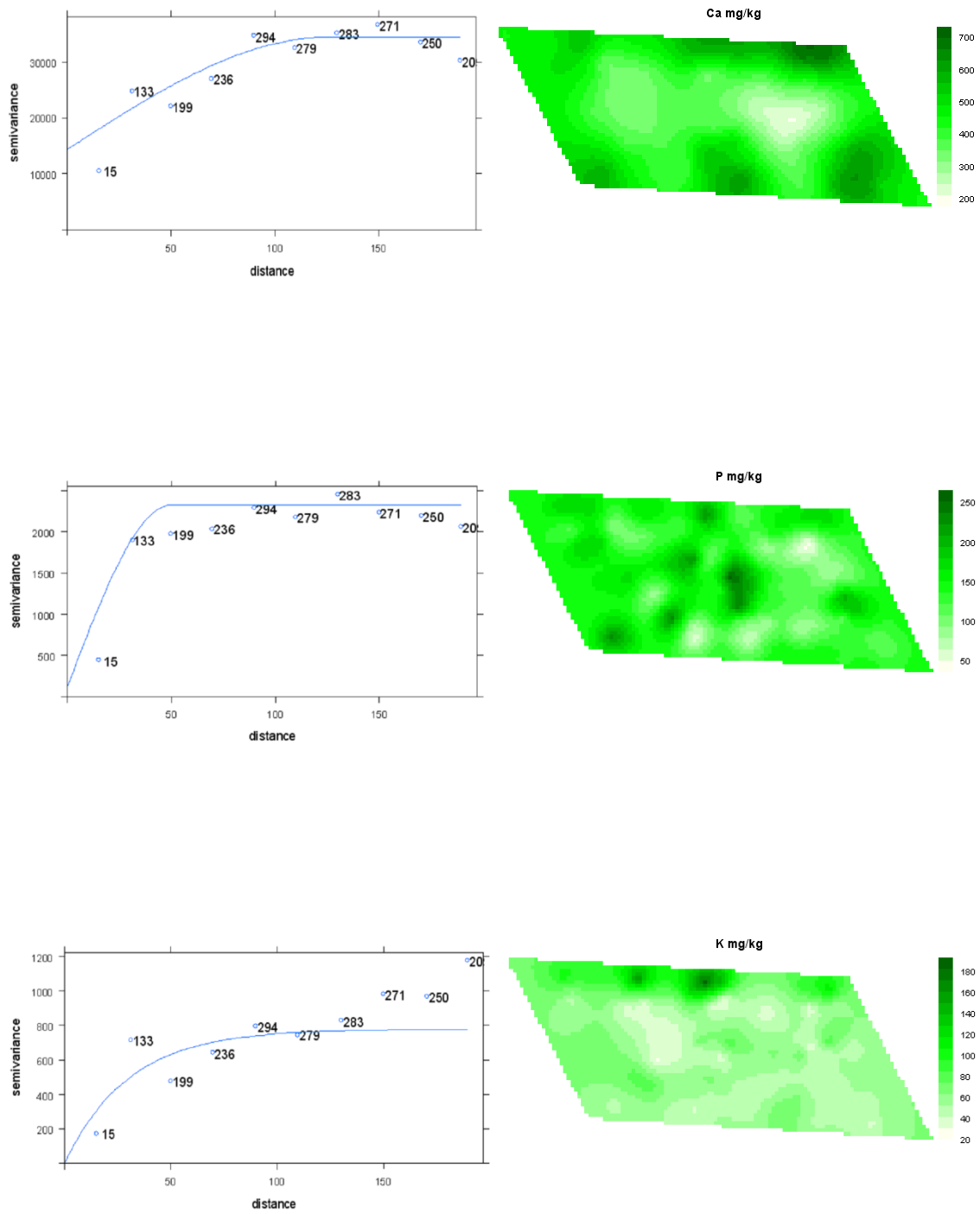


Figura 5.22. *Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de Ca, P y K.*

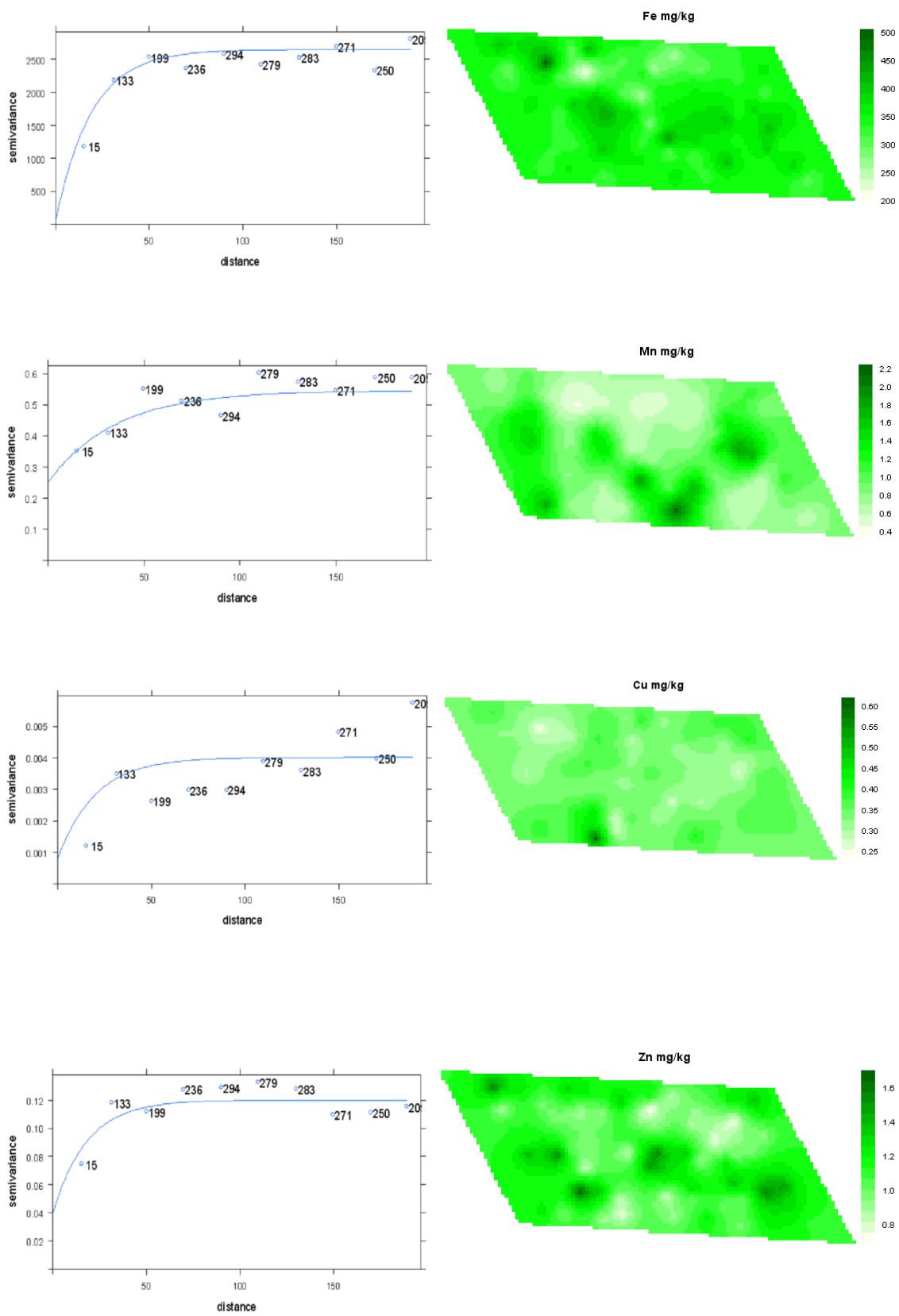


Figura 5.23. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de Fe, Mn, Cu y Zn.

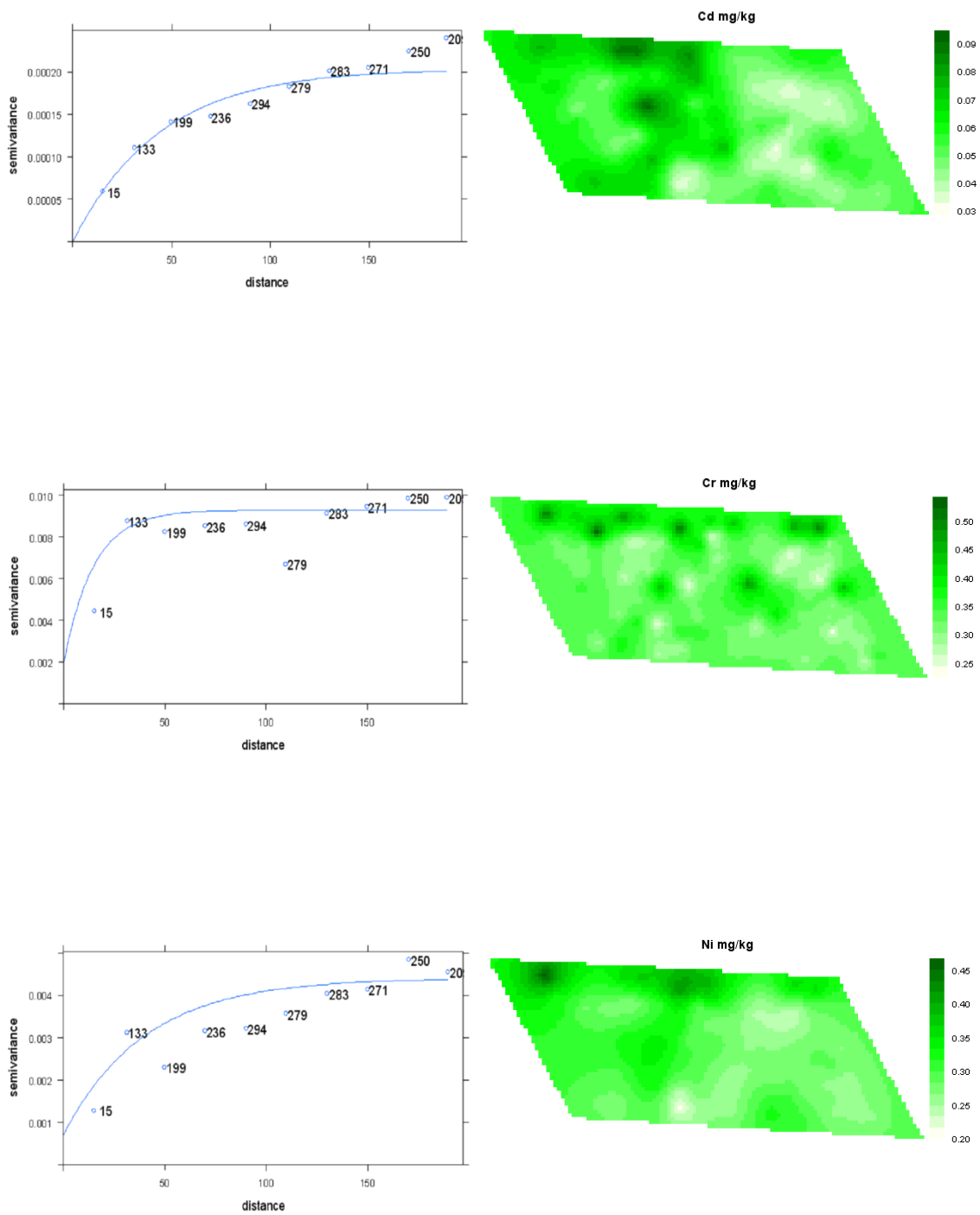


Figura 5.24. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de Cd, Cr, y Ni.

Las Figuras 5.22, 5.23 y 5.24 muestran los semivariogramas y los mapas de de los macro y microelementos (extraídos mediante Mehlich-3) que presentan dependencia espacial. El mapa de *kriging* del Ca muestra que las mayores concentraciones de la mismo se sitúan los bordes Noreste y Sureste de la parcela; contrastando con el mapa de Ca extraído por resina donde la acumulación de Ca se producía en la zona Sur de la parcela. El mapa de *kriging* del $P_{\text{Mehlich-3}}$ es similar al que se obtenía del P_{resina} apareciendo menos cantidad de fósforo en las zonas de mayor altitud de la parcela; siendo la diferencia entre ambos las concentraciones obtenidas por las dos soluciones extractantes. El K por su parte se acumula de forma más significativa en el límite Norte de la parcela. En cuanto a los micronutrientes, el Mn presentan un mapa donde se observa que las menores concentraciones se sitúan en la parte Norte de la parcela y pequeños *núcleos* de mayores concentraciones diseminados por la parcela. El Cu tiene menor concentración en las zonas más elevadas de la parcela. Por otro lado el Fe presenta ciertas similitudes con los mapas del Mn y el Zn. El Zn muestra un mapa donde la mayor parte de la zona central de la parcela tiene las menores concentraciones. En cuanto a los metales pesados, el Cd acumula las mayores cantidades en la parte Oeste y las menores en la zona Este (la zona más alta de la parcela), y el Ni también muestra las menores concentraciones en las zonas más altas de la parcela. Ambos comportamientos eran esperados ya que están en línea con el estudio de componentes principales donde aparecían ambos elementos formando parte del mismo componente (CP_1) y mostraban una relación inversa con la altura. El Cr se acumula en pequeños *núcleos* en la zona norte de la parcela.

5.2.2.2 Profundidad de muestreo 0-20 cm (DTPA)

En la Tabla 5.5 se muestran los resultados del análisis estructural para cada una de los 8 elementos extraídos mediante el reactivo DTPA. El Cr, Cu, Ni y el Zn no presentan dependencia espacial, a diferencia de la extracción mediante Mehlich-3, donde era solo el Pb quien no la presentaba. Cd, Fe, Mn y Pb se ajustan a dos tipos de modelos teóricos, 3 Exponenciales y 1 Gaussiano. Todos los elementos muestran efecto pepita salvo el Mn.

Variable	Modelo	Efecto Pepita	Meseta	Alcance	(C_0/C_0+C)	EM	ECM	ECMA
		C_0	C_0+C	$a_0(m)$				
Fe	Exponencial	21	743	9	0.028	0.7461	668.57	0.9016
Mn	Exponencial	0	0.57	23.5	0	-0.0005	0.4394	1.0092
Cu	Pepita puro							
Zn	Pepita puro							
Cd	Gaussiano	0.00005	0.00009	73	0.631	0.0001	0.00006	0.9793
Cr	Pepita puro							
Ni	Pepita puro							
Pb	Exponencial	0.2	0.79	20	0.253	0.0044	0.7176	1.0138

Tabla 5.5. Modelos ajustados, parámetros del semivariograma y estadísticos obtenidos por validación cruzada (EM=error medio; ECM=error cuadrático medio; ECMA=error cuadrático medio adimensional).

El alcance oscila entre 9-73 m; en la extracción mediante Mehlich-3 salvo para el caso del Cd; tanto el Fe, el Mn y el Pb presentaban mayores alcances. Son ligeramente inferiores a los encontrados por ULLOA GUTIÁN (2002) para los mismos elementos y tipo de extracción. El Mn y el Fe presentan una fuerte dependencia espacial; el Pb y el Cd una dependencia espacial moderada.

Los modelos elegidos pueden considerarse adecuados para describir la variabilidad espacial, dado que los valores de ECMA de los elementos son próximos a 1; siendo el Mn el de mejor ajuste (ECMA=1.0092) y el Fe el de peor (ECMA=0.9016).

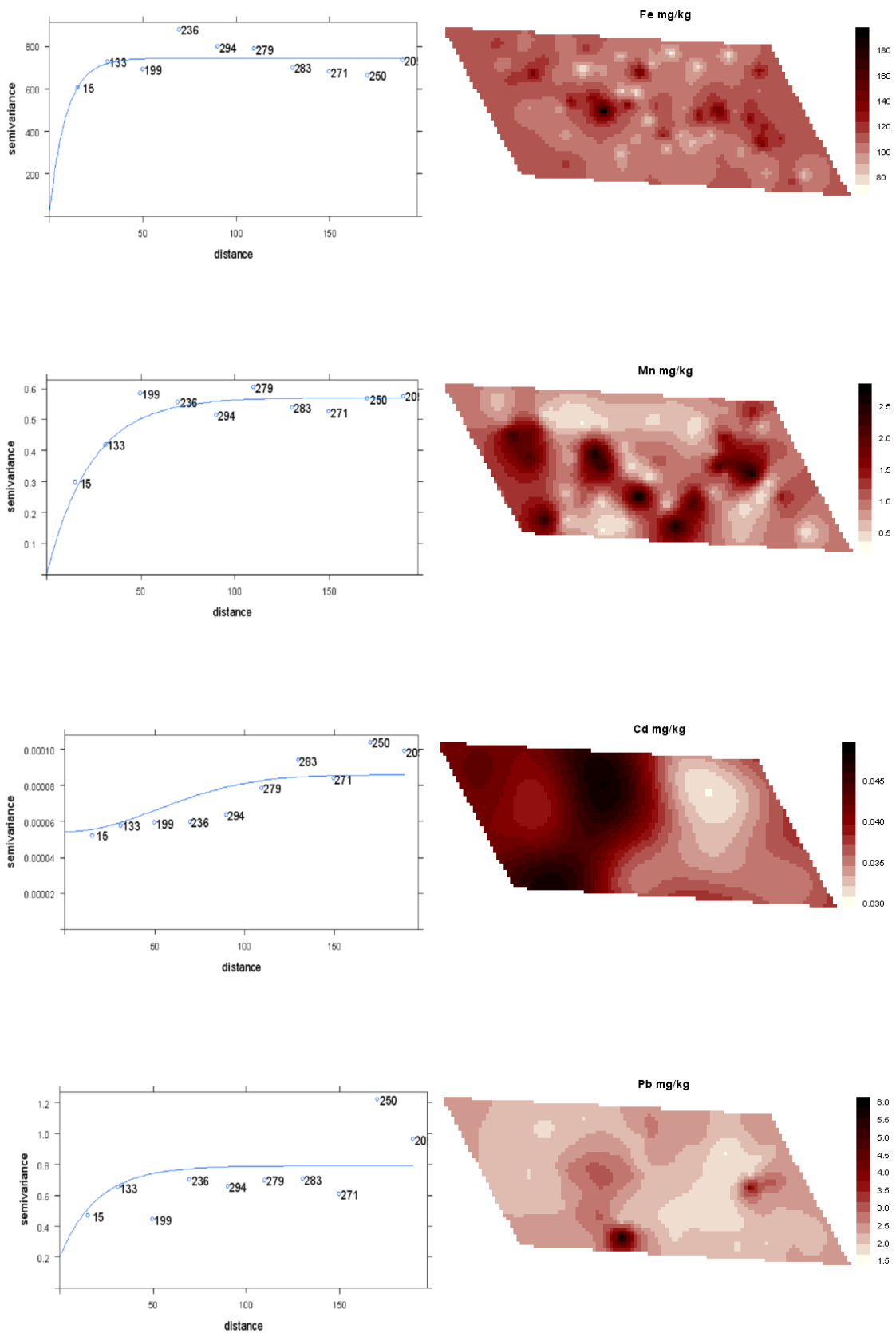


Figura 5.25. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de Fe, Mn, Cd y Pb.

La Figura 5.25 muestra los semivariogramas y los mapas de de los elementos traza (extraídos mediante DTPA) que presentan dependencia espacial. El mapa de Fe se solapa en parte con el de Mn. El mapa de *kriging* del Mn presenta tiene similitudes al del mismo elemento extraído mediante Mehlich-3, algo ya esperado en función de la fuerte correlación lineal que ambas extracciones presentaban en la extracción de este elemento. El Cd muestra un mapa donde las mayores concentraciones se sitúan en el Oeste y las menores en el Este (relacionado también con la altura de la parcela, situándose las mayores concentraciones en las partes más bajas), en este sentido se comporta de la misma forma que el Cd obtenido mediante el reactivo Mehlich-3. El Pb también presenta un mapa de *kriging* donde los valores más bajos se sitúan principalmente en la parte más alta de la parcela.

5.2.2.3 Profundidad de muestreo >20 cm (Mehlich-3)

Variable	Modelo	Efecto Pepita	Meseta	Alcance	(C_0/C_0+C)	EM	ECM	ECMA
		C_0	C_0+C	$a_0(m)$				
Ca	Exponencial	0.0000001	58000	20	0	12.33	53017.49	1.0776
P	Exponencial	0.0000001	935	24	0	0.1830	712.47	1.0023
K	Gaussiano	300	420	67	0.7143	0.0990	352.95	0.9971
Fe	Gaussiano	4417	7217	80	0.6120	0.1537	4936.25	0.9522
Mn	Exponencial	0.001	2.001	23.5	0.0005	0.0398	1.5627	1.0018
Cu	Gaussiano	0.00292	0.00545	45	0.5358	0.0015	0.0056	1.2576
Zn	Exponencial	0.3	0.7	33	0.4286	0.0132	0.7276	1.1966
Cd	Gaussiano	0.000082	0.000169	90	0.4852	0.0001	0.00011	1.1325
Cr	Pepita puro							
Ni	Exponencial	0.0015	0.0059	25.5	0.2542	-0.0010	0.0051	1.0092
Pb	Exponencial	0.0001	1.0301	37.2	0.0001	-0.0310	0.5751	1.0009

Tabla 5.6. Modelos ajustados, parámetros del semivariograma y estadísticos obtenidos por validación cruzada (EM=error medio; ECM=error cuadrático medio; ECMA=error cuadrático medio adimensional).

En la Tabla 5.6 se muestra el análisis estructural para cada uno de los 11 elementos extraídos mediante el reactivo Mehlich-3. El Cr es el único elemento que no presenta dependencia espacial; el resto de los elementos se ajustan a dos tipos de modelos teóricos; 6

Exponenciales y 4 Gaussianos. En comparación con los parámetros obtenidos para la extracción con Mehlich-3 a profundidad 0-20 cm existen sustanciales diferencias, por un lado el Pb sí presenta dependencia espacial en este caso mientras que el Cr no; y además los elementos Mn, Ni y Zn presentan el mismo tipo de modelo teórico (Exponencial).

El alcance oscila entre 20-90 m, inferior al obtenido (extracción Mehlich-3) en la profundidad 0-20 cm; si bien la media del alcance es superior en >20 cm (44.52 m) que la primera profundidad estudiada 0-20 cm (39.60 m).

Presentan una fuerte dependencia espacial los elementos: Ca, P, Mn y Pb. El K, Cd, Cu, Fe, Ni y Zn tienen una dependencia espacial moderada. En general se aprecia una relación entre el grado de dependencia espacial medido por la relación (C_0/C_0+C) a las profundidades estudiadas, aunque algún elemento como en el P, el efecto pepita es muy reducido bien sea a profundidad 0-20 cm como a >20 cm. Tanto a la profundidad de 0-20 cm como a >20 cm se aprecia que la gran mayoría de elementos estudiado presentan dependencia espacial. Sin embargo, la estructura de la dependencia espacial para un elemento determinado es en general muy diferente a estas dos profundidades estudiadas. Los factores de formación del suelo afectan de una manera similar al Horizonte A, es decir a los niveles de 0-20 cm y >20 cm. Por tanto las diferencias de estructuras de la dependencia espacial pueden ser debidas al hecho de que el manejo (laboreo, aplicación de fertilizantes, etc.) afecta de manera distinta a las dos profundidades.

Los modelos elegidos muestran con fiabilidad la variabilidad espacial, dado que los ECMA de todos los elementos son muy próximos a 1; siendo el Pb el de mejor ajuste (ECMA=1.0009) y el Cu el de peor (ECMA=1.2576). Todos los elementos presentan efecto pepita.

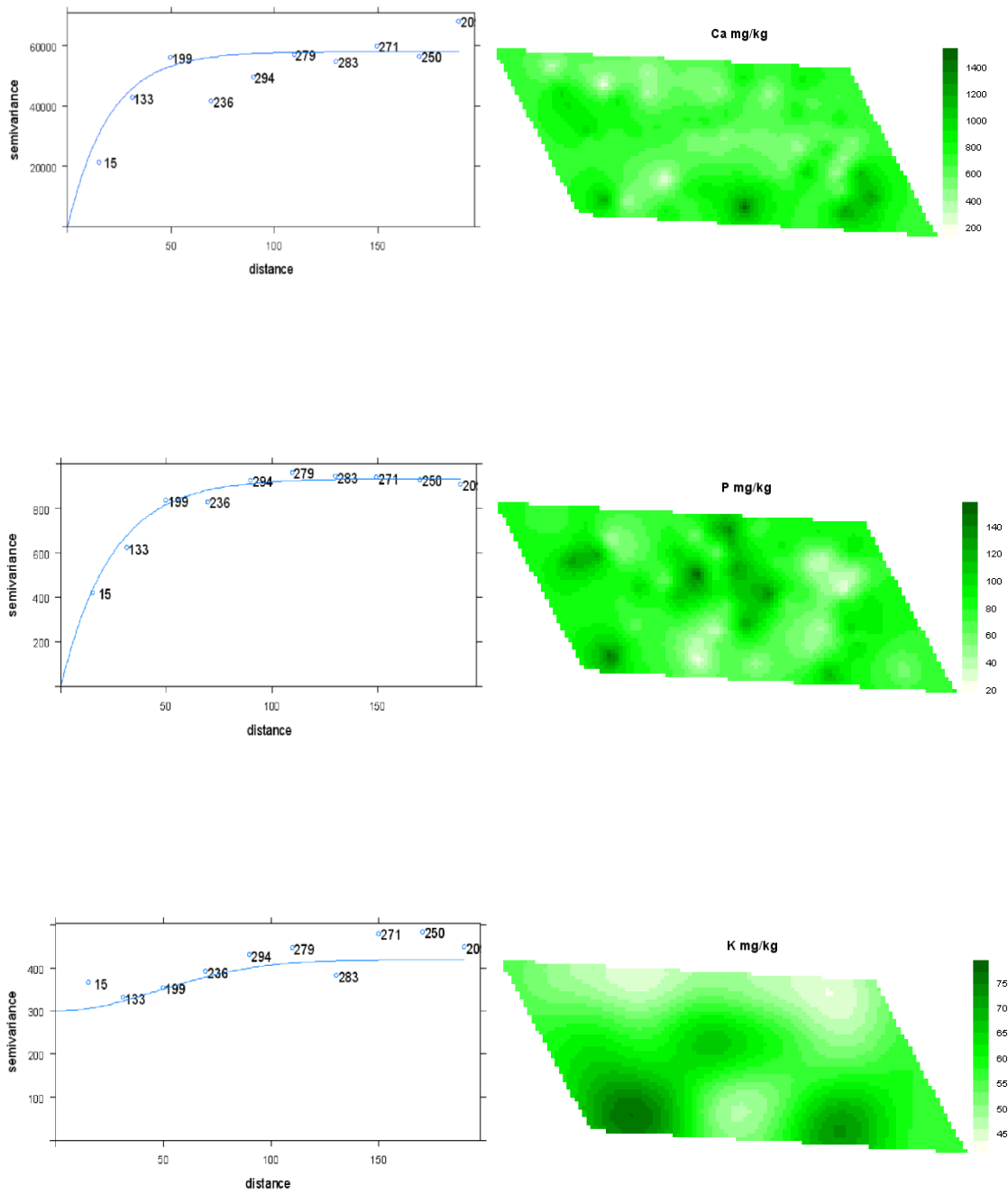


Figura 5.26. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de Ca, P, y K.

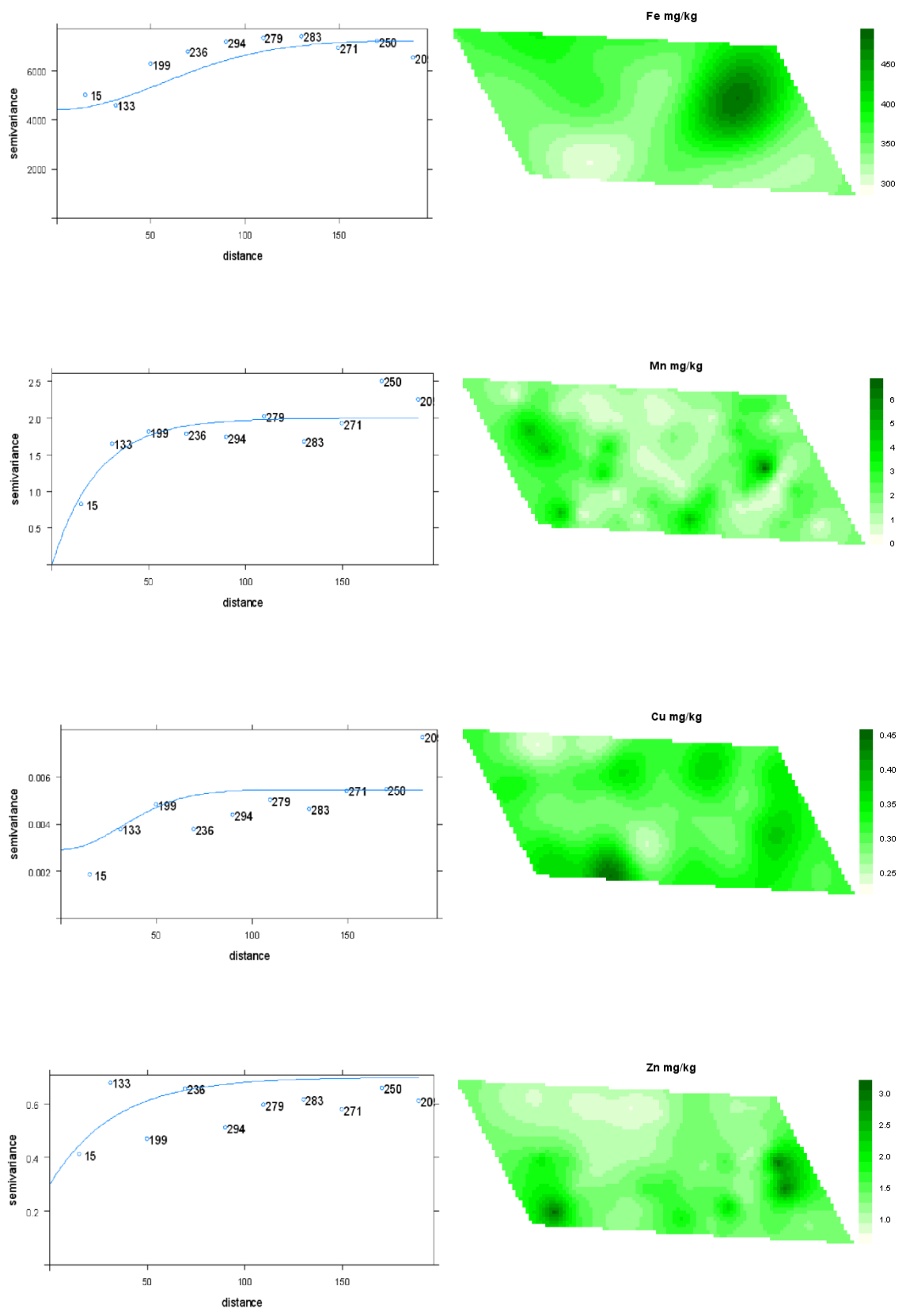


Figura 5.27. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de Fe, Mn, Cu y Zn.

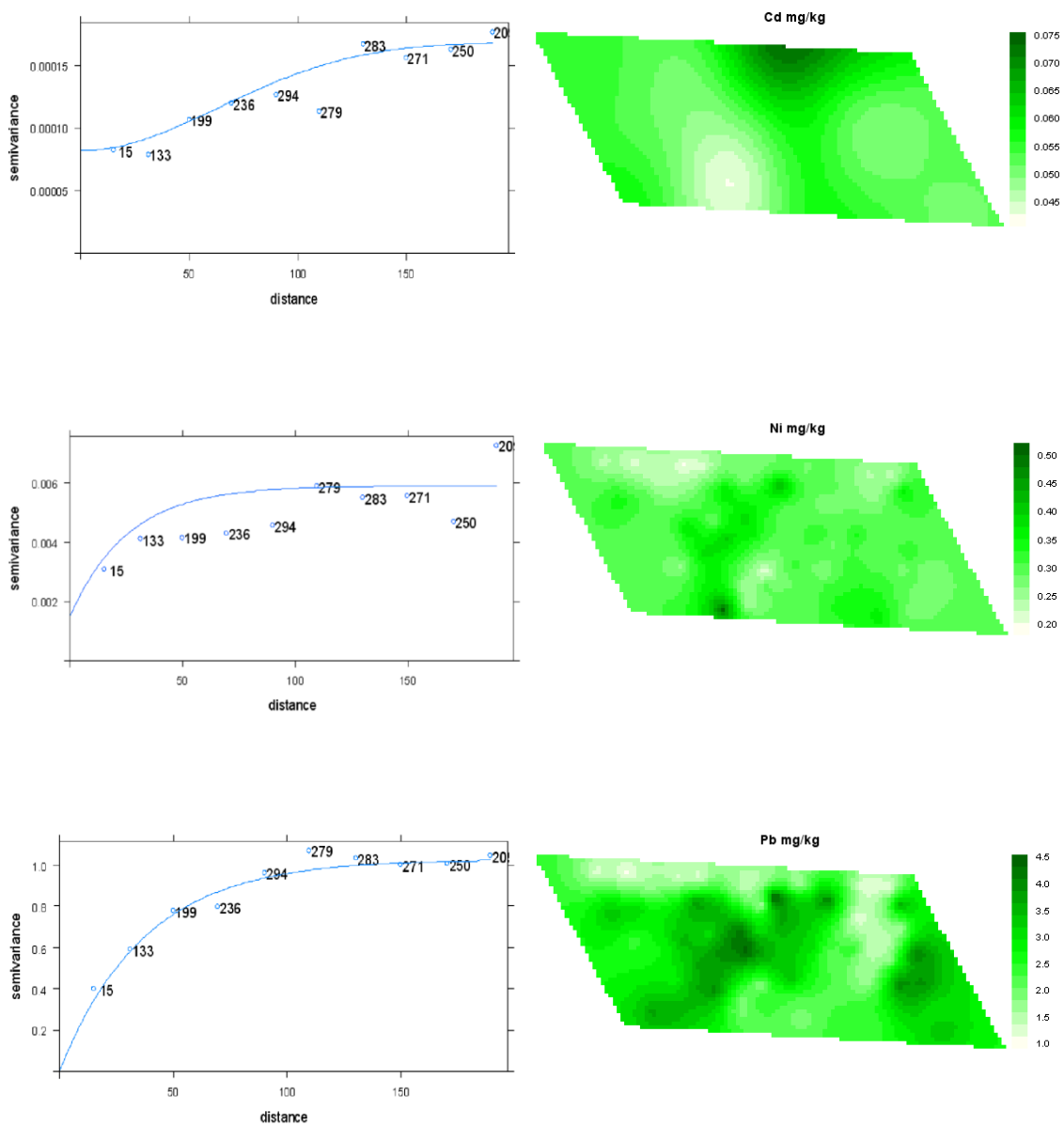


Figura 5.28. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de Cd, Ni y Pb.

Las Figuras 5.26, 5.27 y 5.28 muestran los semivariogramas y los mapas de de los macro y microelementos (extraídos mediante Mehlich-3) que presentan dependencia espacial. El mapa de *kriging* del Ca obtenido a esta profundidad es diferente al obtenido en la profundidad 0-20 cm (extraído mediante Mehlich-3), aunque sigue apareciendo mayor acumulación de Ca en la zona Sureste, si bien en *núcleos* menores al anterior mapas. Sin embargo sí presenta mayores similitudes con el Ca extraído mediante resina a profundidad

>20 cm (Figura 5.15), con menor cantidad de Ca en la parte central. El mapas de *kriging* del P obtenido por Mehlich-3 es similar al que se obtenía mediante resina (a >20 cm) acumulándose menor cantidad de fósforo en las zonas más altas de la parcela, si bien es considerable la diferencia de concentraciones obtenidas por ambos métodos. El mapa de K nos muestra que la mayor cantidad de K se sitúa en la parte Sureste y Suroeste de la parcela, no mostrando similitudes con el mapa de K (extraído mediante Mehlich-3) a 0-20 cm. El mapa de *kriging* del Fe se muestra diferente al obtenido en la profundidad 0-20 (extracción mediante Mehlich-3), acumulándose la mayor cantidad de Fe en un *núcleo* diferenciado en la zona Noreste de la parcela, coincidiendo con la parte de mayor altitud de la misma. El mapa obtenido para el Mn tiene similitudes al que se obtenía a profundidad 0-20 cm (obtenido mediante Mehlich-3), con valores menores a lo largo zona Norte de la parcela y distintos *núcleos* (coincidentes entre profundidades) en diferentes lugares de la parcela; si bien los valores son mayores a profundidad >20 cm. El mapa del Cu a profundidad >20 cm muestra ciertas similitudes con el obtenido a 0-20 cm (mediante Mehlich-3), con un pequeño *núcleos* de mayor concentración en la parte Suroeste de la parcela. El mapa de Zn muestra una menor acumulación de Zn en la mitad Norte de la parcela; sin mostrar similitudes con el mapa de Zn (Mehlich-3) a 0-20 cm. Atendiendo al mapa de *kriging* del Cd observamos que en la mitad Oeste de la parcela la acumulación es menor mientras que dentro de la parte Este es la zona Norte donde más Cd se concentra. Existen ciertas similitudes entre el mapa de *kriging* del $Ni_{Mehlich-3}$ a >20 cm y el $Ni_{Mehlich-3}$ a 0-20 cm, en la parte Este (zona de mayor altitud) la concentración es más baja; si bien la distribución en la parte Oeste es diferente entre ambas profundidades. Por último el Pb una gran zona de mayor concentración en la parte Oeste de la parcela, disminuyendo la misma en la zona de mayor elevación del terreno en la parte Este.

5.2.2.4 Profundidad de muestreo >20 cm (DTPA)

En la Tabla 5.7 se muestra el análisis estructural de cada uno de los 8 elementos extraídos mediante el reactivo DTPA. Para esta segunda profundidad muestreada, únicamente el Pb (algo que no ocurría en la profundidad 0-20 cm en la extracción por DTPA) y el Zn (se comporta de igual forma en ambas profundidades en la extracción DTPA) no presentan dependencia espacial. El Cu, Cr y Ni, no presentaban dependencia espacial en los primeros 20 cm de suelo (extraídos por DTPA) y sí presentan dependencia a >20 cm. Aparecen tres tipos de modelos de ajuste del semivariograma, 4 Esféricos, 1 Gaussiano y 1 Exponencial. En la extracción por DTPA a 0-20 cm, los modelos obtenidos para los elementos con dependencia espacial eran diferentes en todos los elementos respecto a estos modelos.

Variable	Modelo	Efecto	Meseta	Alcance	(C_0/C_0+C)	EM	ECM	ECMA
		Pepita	C_0+C	$a_0(m)$				
		C_0	C_0+C	$a_0(m)$				
Fe	Esférico	495	955	100	0.518	0.2179	903.3245	1.1748
Mn	Esférico	0.01	1.17	50	0.009	0.0288	0.9296	0.9924
Cu	Exponencial	0.0019	0.0032	38	0.594	-0.0008	0.0029	1.0037
Zn	Pepita puro							
Cd	Esférico	0.00004	0.00008	70	0.488	-0.0001	0.000080	1.1199
Cr	Gaussiano	0.00084	0.00237	87	0.355	0.0007	0.0019	1.6799
Ni	Esférico	0.00081	0.00241	79	0.336	-0.0009	0.0020	1.1079
Pb	Pepita puro							

Tabla 5.7. Modelos ajustados, parámetros del semivariograma y estadísticos obtenidos por validación cruzada (EM=error medio; ECM=error cuadrático medio; ECMA=error cuadrático medio adimensional).

El alcance oscila entre 38-100 m; respecto a los elementos extraídos por DTPA a profundidad 0-20 cm, el Cd muestra un alcance similar (70 m frente a 73 m) y para el resto de elementos con dependencia espacial en ambas profundidades, los alcances son mayores los obtenidos a profundidad >20 cm (Fe: 100 m frente a 9 m y Mn: 23.5 m frente a 50 m).

Por tanto en el caso de la dependencia espacial tanto en la extracción con Mehlich-3 como con DTPA, se pone de manifiesto un mayor valor del parámetro alcance a la profundidad >20 cm respecto a 0-20 cm. El Mn tiene una fuerte dependencia espacial, lo que también ocurría a 0-20 cm, por el contrario Cd, Cr, Cu, Fe, y Ni tienen una dependencia espacial moderada; y además el grado de dependencia espacial de estos elementos varía entre 0-20 cm y >20 cm.

Una vez más la razón de las diferencias de estructura espacial entre las dos profundidades puede ser debido al diferente efecto del manejo.

Los modelos elegidos muestran con fiabilidad la variabilidad espacial, dado que los ECMA de los elementos son próximos a 1; siendo el Cu el de mejor ajuste (ECMA=1.0037) y el Cr el de peor (ECMA=1.6799). Todos los elementos presentan efecto pepita.

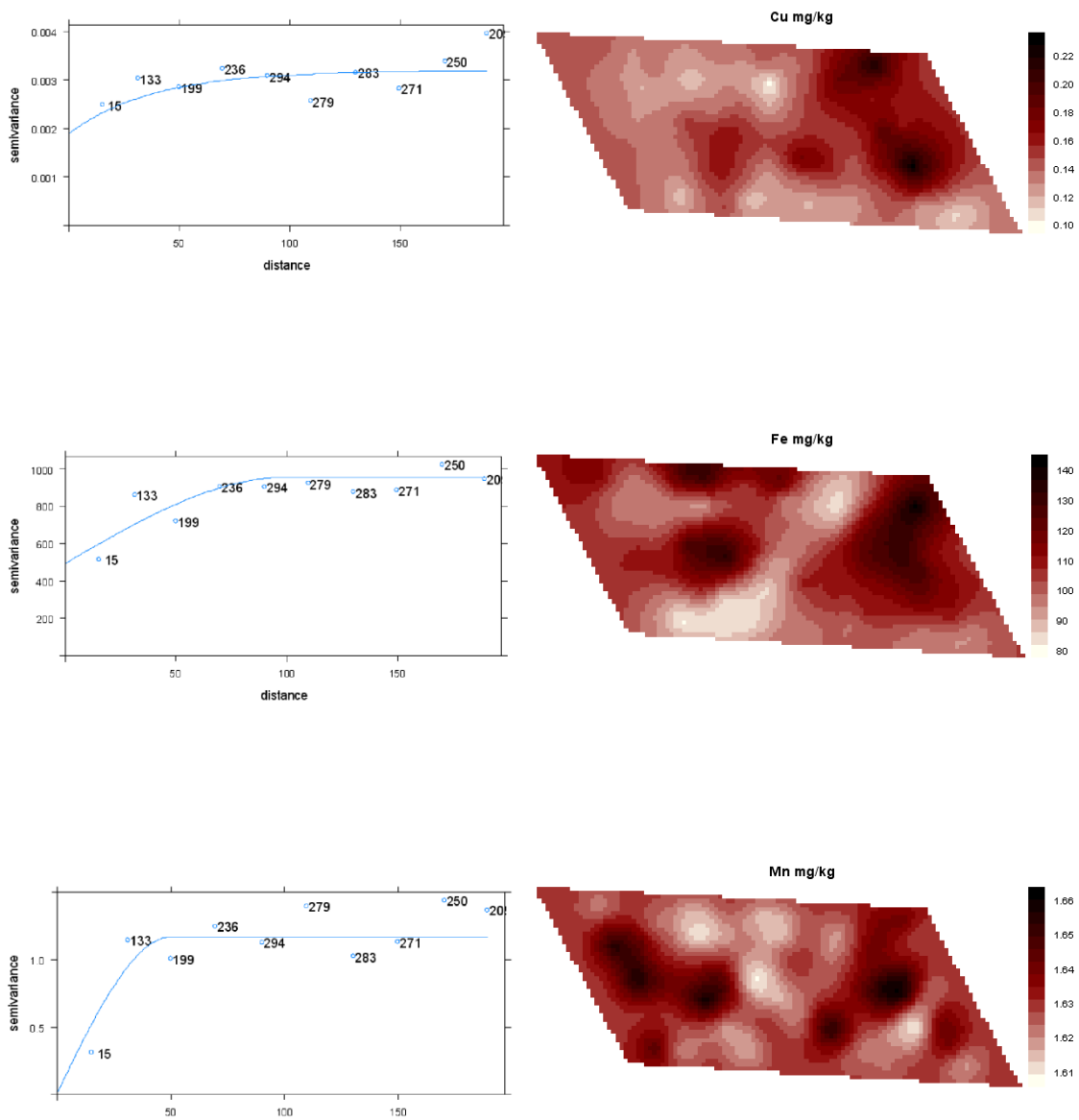


Figura 5.29. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de Cu, Fe y Mn.

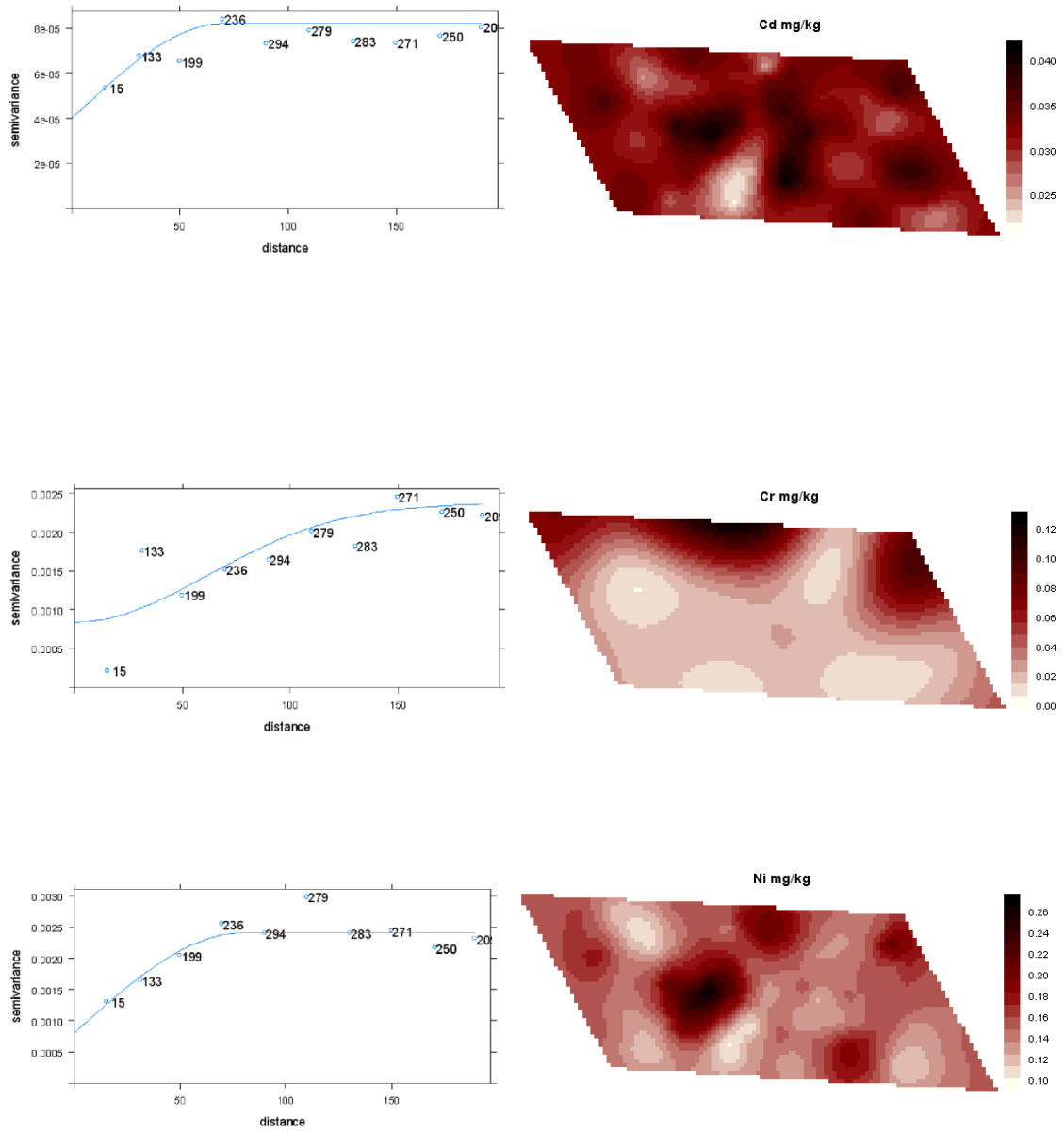


Figura 5.30. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de Cd, Cr y Ni.

Las Figuras 5.29 y 5.30 muestra los semivariogramas y los mapas de de los elementos traza (extraídos mediante DTPA) que presentan dependencia espacial. El mapa de *kriging* del Cu muestra una mayor acumulación en la zona Noreste. El Fe por su parte presenta un mapa de *kriging* muy diferente al obtenido para este mismo elemento y reactivo extractor a profundidad 0-20 cm. Se acumula en mayor medida en la parte Noreste por una parte y en una pequeña parte en la zona central de la zona Oeste. Presenta similitudes con el mapa de Fe (0-20 cm) extraído por Mehlich-3, que también se acumulaba en la zona Noreste descrita y con un *núcleo* de valores más bajos en la parte Suroeste. El Mn por su parte tiene un mapa de *kriging* que muestra que la dependencia espacial a esta profundidad tiene similitudes a la obtenida a profundidad 0-20 cm y también con el mapa de Mn (Mehlich-3) obtenido para >20 cm, con *núcleos* de mayor concentración coincidentes. El Cd presenta un mapa de *kriging* que no muestra parecido al obtenido para la profundidad 0-20 cm. El mapa del Cr por su parte, muestra que los mayores valores se sitúan a lo largo de la parte Norte de la parcela. El mapa de *kriging* del Ni, muestra que el Ni se acumula en una serie de *núcleos* en la parcela siendo el más destacable el central de la zona Oeste, coincidiendo en esa zona con el Fe. La comparación entre los mapas de *kriging* de Ni_{DTPA} y $Ni_{Mehlich-3}$ (a profundidad >20 cm) muestra que existen ciertas similitudes, una zona de menor concentración de Ni en la parte Este de la parcela y una zona de mayor concentración en la parte central de la zona Oeste.

5.2.2.5 Horizonte A (Mehlich-3)

En la Tabla 5.8 se muestran los resultados del análisis estructural de cada uno de los 11 elementos extraídos mediante Mehlich-3. El Zn no presenta dependencia espacial a diferencia de la profundidad 0-20 cm donde si lo hacía; en cambio el Pb si es espacialmente dependiente, algo que no ocurría en los primeros 20 cm de suelo. Los restantes elementos se ajustan a dos tipos de modelos teóricos, 8 Exponenciales y 2 Esféricos.

Variable	Modelo	Efecto Pepita	Meseta	Alcance	(C_0/C_0+C)	EM	ECM	ECMA
		C_0	C_0+C	$a_0(m)$				
Ca	Esférico	17500	36000	110	0.486	8.30	28895.80	1.0258
P	Esférico	100	1275	59	0.078	0.8321	909.03	1.0036
K	Exponencial	0	340	25	0	0.4539	243.69	1.0073
Fe	Exponencial	0	3050	19	0	0.0743	2477.31	0.9967
Mn	Exponencial	0.2	1.05	35	0.190	0.0145	0.7593	1.0069
Cu	Exponencial	0.0007	0.0037	22.21	0.189	0.0019	0.0034	1.0279
Zn	Pepita puro							
Cd	Exponencial	0	0.00014	45	0	0.0003	0.00006	1.0011
Cr	Exponencial	0.001	0.0055	14.5	0.182	0.0017	0.0053	0.9997
Ni	Exponencial	0.001	0.0028	40	0.357	0.0011	0.0022	1.0105
Pb	Exponencial	0.07	0.72	30	0.097	-0.0182	0.5060	1.0037

Tabla 5.8. Modelos ajustados, parámetros del semivariograma y estadísticos obtenidos por validación cruzada (EM=error medio; ECM=error cuadrático medio; ECMA=error cuadrático medio adimensional).

El alcance oscila entre 14.5-110 m, muy similares a los obtenidos en la profundidad 0-20 cm. Presentan una fuerte dependencia espacial los elementos: K, Cd, Fe, P, Pb, Cr, Cu y Mn. El Ni y el Ca tienen una dependencia espacial moderada.

Los modelos elegidos muestran con bastante fiabilidad la variabilidad espacial, dado que los ECMA de todos los elementos son muy próximos a 1; siendo el Cr el de mejor ajuste (ECMA=0.9997) y el Cu el de peor (ECMA=1.0279). Los elementos que no presentan efecto pepita son el K, el Cd y el Fe.

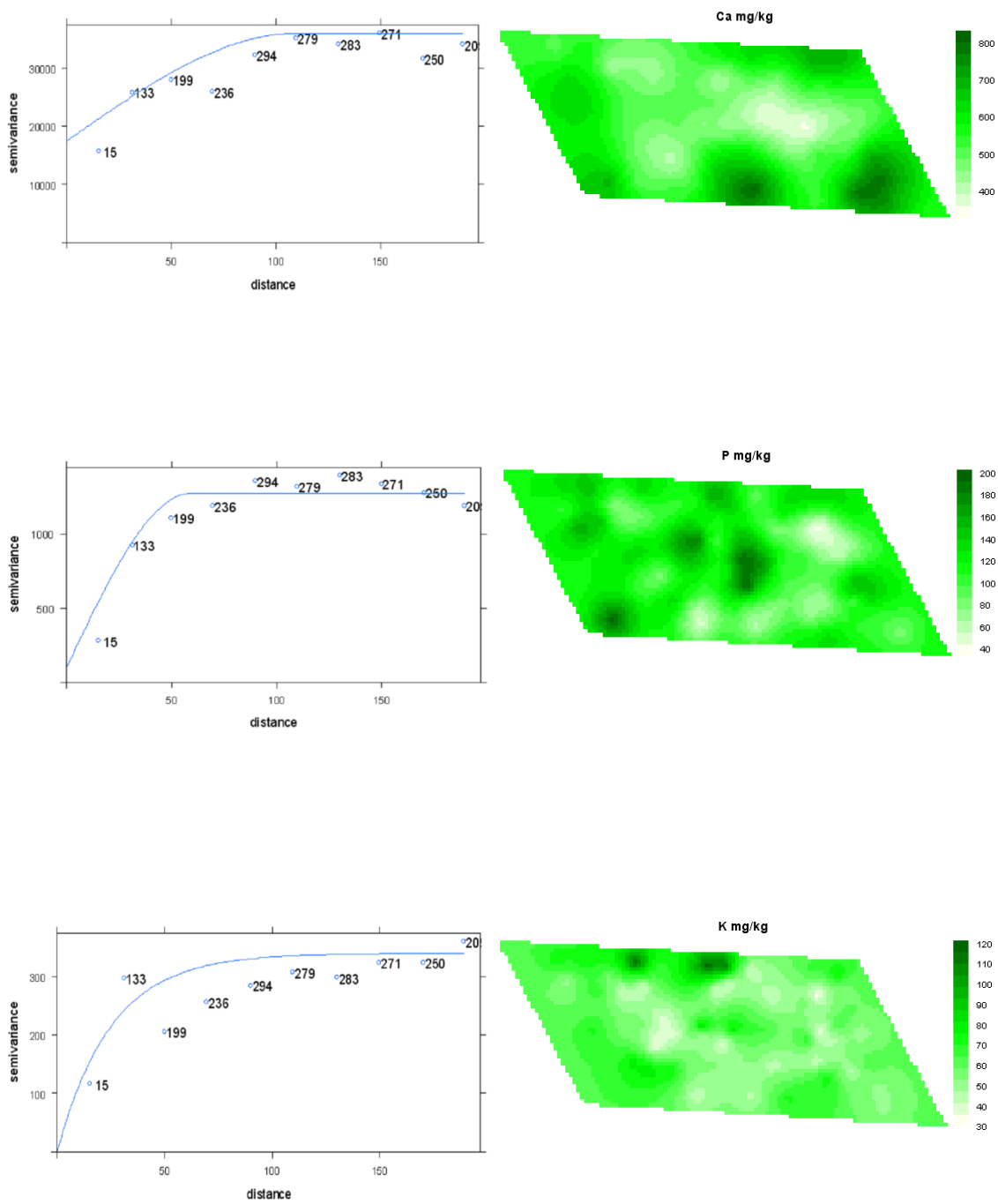


Figura 5.31. *Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de Ca, P y K.*

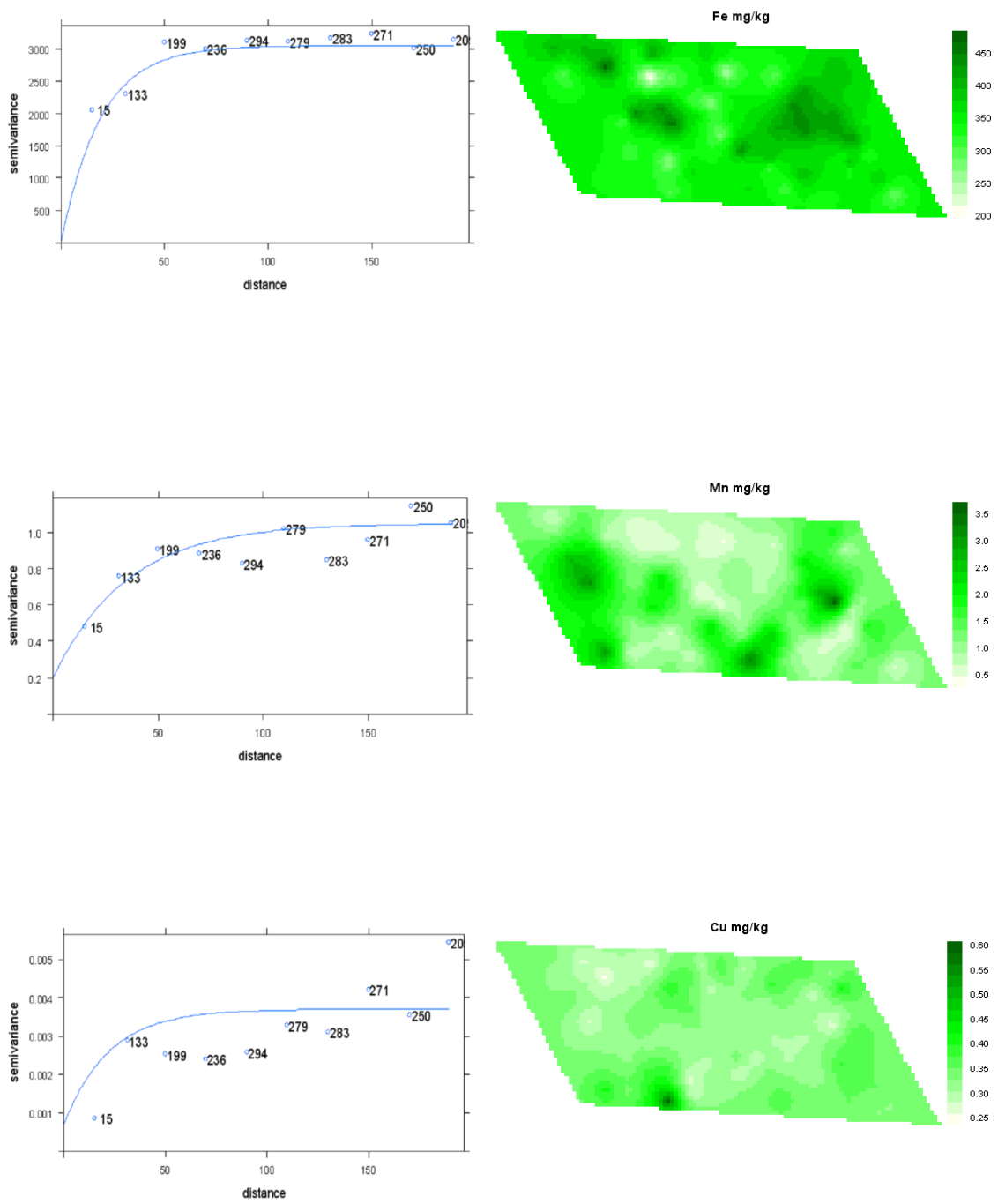


Figura 5.32. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de Fe, Mn y Cu.

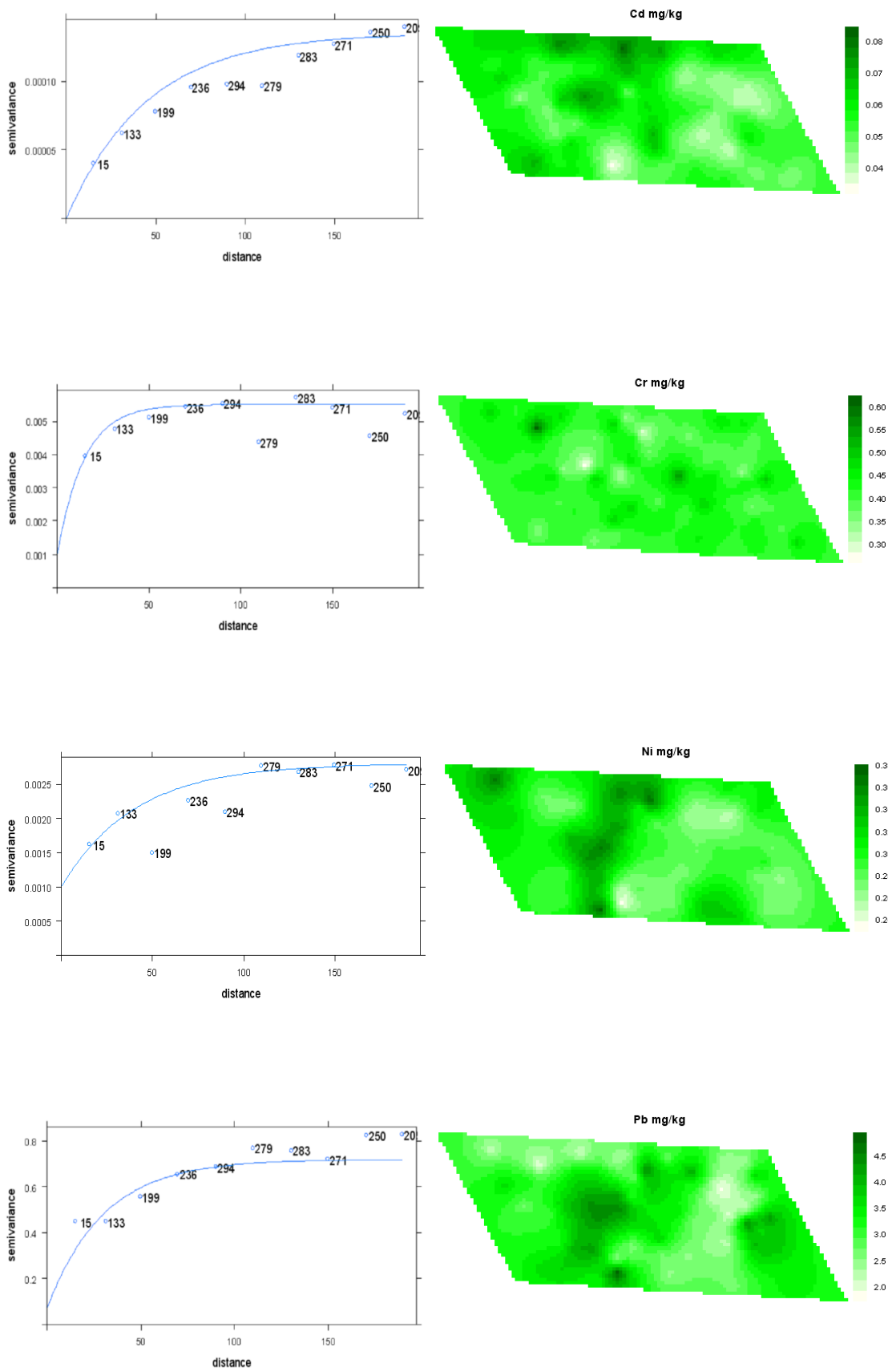


Figura 5.33. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de Cd, Cr, Ni y Pb.

Las Figuras 5.31, 5.32 y 5.33 muestran los semivariogramas y los mapas de de los elementos extraídos (mediante Mehlich-3) que presenta dependencia espacial. El mapa de *kriging* del Ca muestra que las mayores concentraciones del mismo se sitúan los borde Sureste de la parcela; siendo el mapa similar al mapa de Ca extraído por resina. El mapas de *kriging* del $P_{\text{Mehlich-3}}$ es similar al que se obtenía del P_{resina} apareciendo menos cantidad de fósforo en las zonas más altas de la parcela; siendo importante la diferencia de concentraciones obtenidas mediante las dos soluciones extractantes. El mapa de K muestra una amplia zona central con valores menores de K, siendo el mapa más semejante al de profundidad 0-20 cm que al de >20 cm. Atendiendo al mapa del Fe, se observa un *núcleo* de mayor acumulación en parte la zona Este, coincidiendo con la mayor elevación de la parcela. El mapa de Mn obtenido sigue la tendencia de las anteriores profundidades, menor concentración en la parte central de la zona Norte, y diferentes *núcleos* a lo largo de la parcela. En cuanto a los metales pesados, el Cd, y el Ni, muestra menores concentraciones en las zonas más altas de la parcela; aunque la distribución de las mayores concentraciones es diferente. El Ni presenta una franja central (Norte-Sur) de mayor concentración y el Cd por su parte muestra las mayores concentraciones a lo largo del borde Norte de la parcela. En el caso del Cr, hay que tener en cuenta las bajas concentraciones obtenidas; el mapa obtenido para el Horizonte A presenta algunas semejanzas al obtenido a profundidad 0-20 cm. El Pb una gran zona de mayor concentración en la parte central de la parte Oeste de la parcela, disminuyendo en la zona de mayor elevación del terreno en la parte Este. Los mapas de *kriging* de elementos P, Cd y Pb muestran similitudes con el mapa de la CE_aV . El P y el Cd coinciden con la CE_aV en que presenta los menores valores en la parte Noreste y el Pb por su parte en el *foco* central de la mitad Oeste donde sus valores (como los de la CE_aV) son mayores.

5.2.2.6 Horizonte A (DTPA)

En la Tabla 5.9 se muestran los resultados del análisis estructural de cada uno de los 11 elementos extraídos mediante DTPA. El Cr, Cu, Ni y Zn no presentan dependencia espacial a diferencia de lo que ocurre en la extracción mediante el reactivo Mehlich-3 en el Horizonte A, donde únicamente el Zn presentaba efecto pepita puro. El comportamiento es similar a la extracción DTPA en los primeros 20 cm de suelo apareciendo dos tipos de modelos teóricos, 3 Exponenciales (Fe, Mn y Pb) y 1 Gaussiano (Cd). Una vez más al estudiar todo el Horizonte A se comprueba que la estructura espacial es diferente si la extracción ha sido realizada mediante Mehlich-3 o por DTPA.

Variable	Modelo	Efecto Pepita	Meseta	Alcance	(C_0/C_0+C)	EM	ECM	ECMA
		C_0	C_0+C	$a_0(m)$				
Fe	Exponencial	40	649	10	0.06	0.5868	584.20	0.9101
Mn	Exponencial	0	0.768	26.75	0	0.0081	0.5449	0.9973
Cu	Pepita puro							
Zn	Pepita puro							
Cd	Gausiano	0.00004	0.00006	73	0.65	0.00005	0.00005	1.0463
Cr	Pepita puro							
Ni	Pepita puro							
Pb	Exponencial	0.19	0.58	20	0.33	-0.0051	0.5281	0.9947

Tabla 5.9. Modelos ajustados, parámetros del semivariograma y estadísticos obtenidos por validación cruzada (EM=error medio; ECM=error cuadrático medio; ECMA=error cuadrático medio adimensional).

El alcance oscila entre 10-73 m, similares a los obtenidos en la profundidad 0-20 cm (DTPA). Presentan una fuerte dependencia espacial el Mn y el Fe. El Pb y el Cd tienen una dependencia espacial moderada.

Los modelos elegidos muestran con fiabilidad la variabilidad espacial, dado que los ECMA de todos los elementos son muy próximos a 1; siendo el Mn el de mejor ajuste (ECMA=0.9973) y el Fe el de peor (ECMA=0.9101). Todos los elementos presentan efecto pepita salvo el Mn.

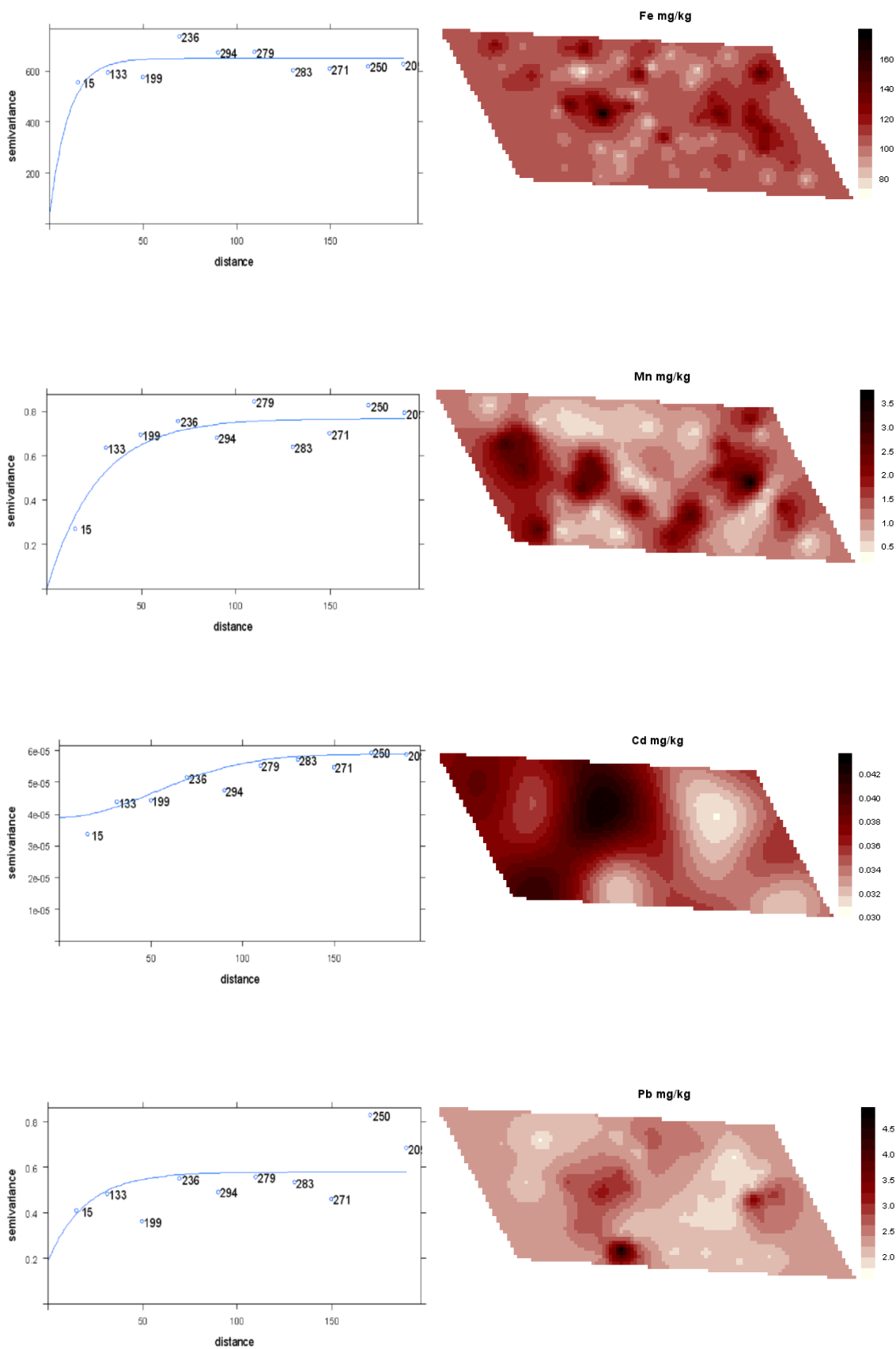


Figura 5.34. Semivariogramas y mapas de kriging ordinario de Fe, Mn, Cd y Pb.

Las Figura 5.34 muestra los semivariogramas y los mapas de de las propiedades químicas (extraídas mediante DTPA) que presentan dependencia espacial. El mapa de Fe muestra grandes similitudes con el mapa obtenido a la profundidad 0-20 cm (utilizando DTPA como reactivo). El mapa de *kriging* del Mn es muy similar al del mismo elemento extraído mediante Mehlich-3, algo ya esperado en función de la fuerte correlación lineal que ambos presentaban. El Cd se muestra un mapa donde las mayores concentraciones se sitúan en las zonas más bajas de la parcela (en la zona Oeste) y las menores en las zonas altas (parte Este de la parcela). El mapa de *kriging* del Pb muestra grandes similitudes con el mapa de Pb obtenido mediante DTPA a profundidad 0-20 cm, apareciendo menor cantidad de Pb en la parte de mayor altitud de la parcela.

5.4 CONCLUSIONES

1. Tanto la CE_aH como la CE_aV tienen una dependencia espacial fuerte. Ambas se ajustan al modelo Esférico (con efectos pepita pequeños) con alcances de 78 m para la CE_aH y 97 m para la CE_aV .
2. De las 14 propiedades generales estudiadas en el Horizonte A, 10 de ellas presentan dependencia espacial, con unos alcances entre 13.6 m y 128 m. Los modelos de mejor ajuste del semivariograma fueron 5 Esféricos (MO, pH, P, arcilla y arena) y 5 Exponenciales (Ca, Al, Sb, V y limo). La dependencia espacial es fuerte en el caso de la MO, pH, P, arcilla y arena. A profundidad >20 cm 12 de las 14 propiedades presentaron dependencia espacial frente a las 9 de la profundidad 0-20 cm. Además a profundidad >20 cm el alcance fue mayor que a profundidad 0-20 cm, salvo para el caso del P y la arcilla.
3. De los elementos obtenidos por Mehlich-3 en el Horizonte A, 10 de los 11 elementos estudiados tienen dependencia espacial (únicamente el Zn tiene efecto pepita puro). Los alcances oscilan entre 14.5 m y 110 m. Los modelos son 8 Exponenciales (K, Cd, Cr, Ni, Pb, Fe, Mn y Cu) y 2 Esféricos (Ca y P). Presentan una fuerte dependencia espacial los elementos: K, Cd, Fe, P, Pb, Cr, Cu y Mn. El intervalo de los alcances en la profundidad 0-20 cm es superior a en la profundidad >20 cm; si bien la media del alcance es superior en >20 cm que a 0-20 cm. La estructura de la dependencia espacial para un elemento determinado es en general muy diferente a las dos profundidades estudiadas.

4. De los elementos obtenidos por DTPA en el Horizonte A, 4 de los 8 elementos estudiados tienen dependencia espacial (Cd, Fe, Mn y Pb). Los alcances oscilan entre 10 m y 73 m. Los modelos son 3 Exponenciales (Fe, Mn y Pb) y 1 Gaussiano (Cd). Presentan una fuerte dependencia espacial el Mn y el Fe. A la profundidad >20 cm 6 de los 8 elementos traza estudiados presentan variabilidad espacial frente a los 4 a profundidad 0-20 cm. Los alcances son mayores a los obtenidos en la profundidad >20 cm (salvo el Cd, que es similar). También en el caso de la extracción por DTPA, la estructura espacial es diferente a las dos profundidades.
5. Los mapas de *kriging* ponen de manifiesto que la MO tiende a ser más abundante en las zonas más altas de la parcela y más bajas en la hondonada donde se forma la laguna temporal. La arcilla por el contrario muestra mayor concentración en dicha hondonada y menores cantidades en las zonas más altas de la parcela.
6. El mapa de P, a profundidad 0-20, >20cm y el Horizonte A; muestra la tendencia a acumularse en la microdepresiones de la parcela, fenómeno que se achaca a procesos erosivos.
7. Los mapas de *kriging* con Mehlich-3, DTPA a una u otra profundidad ponen de manifiesto que la variabilidad espacial presenta diferencias al comparar distintos elementos extraídos mediante un extractante u otro, y también al comparar el mismo elemento en distintas profundidades. En resumen se recomienda utilizar un análisis geoestadístico más avanzado (*cokriging*) para ampliar la información cartográfica obtenida.

CAPITULO 6 CONCLUSIONES GENERALES

1. El horizonte A de la finca estudiada presenta textura franco arenosa o franca, con un contenido medio en arena de un 53.16%. El pH medio es muy ácido, con un valor de 4.40 y el contenido en materia orgánica (MO) medio es de 64.37 g·kg⁻¹. Los coeficientes de variación de menor a mayor son: pH<CIC<MO<H+Al<SB<K<Ca<V<Al<Mg. El Horizonte A es relativamente homogéneo, si bien los valores de la MO y el pH son menores en la profundidad >20 cm; además la arcilla y el limo también disminuyen en profundidad.
2. Los contenidos medios del Horizonte A de elementos extraídos con Mehlich-3 son mayores que los determinados con DTPA, salvo para el caso del Mn, donde la concentración media es similar. Los coeficientes de variación de los elementos extraídos mediante Mehlich-3 aumentan de la siguiente manera Fe<Ni<Cr<Cu<Cd<Pb<K<P<Ca<Zn<Mn. Los coeficientes de variación en la extracción DTPA crecen de la siguiente forma: Cd<Ni<Fe<Cu<Pb<Mn<Zn<Cr.
3. Las correlaciones lineales más elevadas de la CE_aV y la CE_aH son con la MO (sentido negativo) y con la arcilla (sentido positivo). La CE_aH presenta correlaciones altamente significativas (positivas) con el P_{Mehlich-3}, el P_{Resina} y el Ca_{resina}. La CE_aV se correlaciona (con alta significación y en sentido positivo) con el Fe_{DTPA}, Cd_{DTPA}, Ni_{DTPA}, Pb_{DTPA}, Cd_{Mehlich-3}, Ni_{Mehlich-3} y Pb_{Mehlich-3}.
4. Al analizar las propiedades generales, el componente (CPG₃), donde destacan CIC, K, MO, presenta correlaciones altamente significativas con la altura de la parcela (sentido negativo) y la CE_aV (sentido positivo). El CPG₂ donde las fracciones granulométricas son las propiedades más importantes,

muestra correlación altamente significativa (positiva) con la CE_aV y CE_aH . El CPG_4 que tiene a la MO como propiedad dominante muestra correlación lineal altamente significativa (positiva) con la altura de la parcela.

5. El primer componente de la extracción con Mehlich-3, en el cual, el Cu, el Pb y el Ni son los elementos dominantes presenta correlaciones altamente significativas; de sentido negativo con la altura y de sentido positivo con la CE_aV . El primer componente de la extracción por DTPA, en el cual el Cd el Fe y el Ni, son los elementos destacados; presenta una correlación altamente significativa con la CE_aV . El tercer componente donde el Zn y el Mn son los principales elementos presenta una correlación altamente significativa y de sentido positivo con la altura de la parcela.
6. Tanto la CE_aH como la CE_aV tienen una dependencia espacial fuerte. Ambas se ajustan al modelo Esférico (con efectos pepita pequeños) con alcances de 78 m para la CE_aH y 97 m para la CE_aV .
7. De las 14 propiedades generales estudiadas en el Horizonte A, 10 de ellas presentan dependencia espacial. Los modelos de mejor ajuste del semivariograma fueron 5 Esféricos (MO, pH, P, arcilla y arena) y 5 Exponenciales (Ca, Al, Sb, V y limo). La dependencia espacial más fuerte se obtuvo en el caso de la MO, pH, P, arcilla y arena. De los 11 elementos extraídos por Mehlich-3 en el Horizonte A, 10 de ellos tienen dependencia espacial y únicamente el Zn presenta efecto pepita puro. Los modelos son 8 Exponenciales (K, Cd, Cr, Ni, Pb, Fe, Mn y Cu) y 2 Esféricos (Ca y P). Presentan una fuerte dependencia espacial los elementos: K, Cd, Fe, P, Pb, Cr, Cu y Mn De los elementos 8 extraídos con DTPA en el Horizonte A, 4 de ellos tienen dependencia espacial (Cd, Fe, Mn y Pb). Los modelos son 3

Exponenciales (Fe, Mn y Pb) y 1 Gaussiano (Cd). Presentan una fuerte dependencia espacial el Mn y el Fe.

8. Los mapas de *kriging* de las CE_aH y CE_aV muestran que los valores más altos se obtuvieron en la parte central de la parcela, y en la zona Norte de la misma; solapándose en parte con el mapa de arcilla. El mapa de arcilla muestra unos mayores valores en la hondonada de la parcela donde se forma la “laguna” en invierno y valores menores en la parte de mayor altitud de la parcela. El mapa de obtenido para la MO se muestra contrario a las CE_a y la arcilla, con mayores concentraciones al aumentar la altura.

SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS

El *kriging* ordinario, no ha podido ser utilizado para representar la distribución espacial de todas las propiedades, ya que para aquellas propiedades que presentan efecto pepita puro el mapa de distribución espacial obtenido con esta técnica sería menos preciso que el resultante de asumir los valores medios en toda la parcela. Por ello, puede ser interesante emplear otros métodos (basados o no en la Geoestadística) con el fin de poder cartografiar estas variables no representadas.

Un método para la construcción de mapas puede ser el de las *distancias inversas* (IDW); la interpolación se lleva a cabo dándole mayor peso a los valores medidos que se ubican más cerca del punto en que se realiza la interpolación y menor peso a los lejanos. Por lo tanto, en este tipo de interpolación se considera que el peso de cada dato experimental es inversamente proporcional a su distancia desde el punto que está siendo estimado (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

También existe la posibilidad de realizar *cokriging*, lo que permite considerar distintos tipos de información secundaria, referente a otros atributos relacionados con la propiedad estudiada. Cuando los datos muestrales son escasos o están muy poco correlacionados en el espacio, la estimación puede mejorar sustancialmente si se incorpora esa información adicional. La variable principal se estima en un punto mediante una combinación lineal de los datos obtenidos en distintos lugares para las variables principal y secundaria. Se podría utilizar el *cokriging* en primer lugar entre propiedades que hayan sido muestreadas en los 80 puntos y otras de las que se disponga información más exhaustiva y con las que presenten correlación. En este caso por ejemplo la MO y la CE_a medida en continuo, la MO (medida en los 80 puntos) y la altura medida con una mayor resolución, por ejemplo cada 5 metros. También puede llevarse a cabo *cokriging* isotrópico, a partir de variables que hayan sido medidas en los 80 puntos muestrales que estén relacionadas entre

sí. Entre las propiedades en las que pudiese ser interesante utilizar *cokriging* isotrópico, pueden mencionarse:

- Propiedades medidas en los 80 puntos y correlacionadas con CE_a o la altura de la parcela (medidas en los 80 puntos). Por ejemplo: arcilla con CE_a o altura.
- Propiedades medidas en los 80 puntos correlacionadas con otras propiedades medidas en los mismos puntos. Por ejemplo: MO-arcilla, pH y V, $Fe_{\text{Mehlich-3}}$ Fe_{DTPA} .
- Entre un elemento o propiedad del suelo (que no hubiese podido ser representado mediante *kriging* por tener efecto pepita puro) y un componente principal (obtenido a partir de las medidas en los 80 puntos) al que dicho elemento o propiedad “contribuya” significativamente. En este trabajo por ejemplo, podría ser el K (profundidad 0-20 cm) y el CPG_1 .

BIBLIOGRAFÍA

ABREU, C.A., ABREU, M.F. & ANDRADE, J.C. (1998). *Distribuição de chumbo no perfil de solos avaliada pelas soluções de DTPA e Mehlich-3*. *Bragantia*. 57 (1):185-192.

ABREU, C.A., VAN RAIJ B., ABREU, M.F. & PAZ GONZÁLEZ, A. (2005). *Routine soil testing to monitor heavy metals and boron*. *Scientia Agricola* 62:564-571.

AGUILAR, J., DORRONSORO, C., GALÁN, E. & GÓMEZ ARIZA, J.L. (1999): *Los criterios y estándares para declarar un suelo como contaminado en Andalucía y la metodología y técnica de toma de muestras y análisis para su investigación*. Investigación y Desarrollo Medioambiental en Andalucía. OTRI. Universidad de Sevilla, pp 61-64.

ALLOWAY, B.J. (1995). *Heavy metals in soils*. Blackie Academic and Professional. Chapman & Hall. Glasgow. 368 pp.

ALLRED, B.J., DANIELS, J.J. & EHSANI, M.R. (2008). *General considerations for geophysical methods applied to agriculture*. Allred, B.J, Daniel, J.J. y Ehsani, M.R.(Ed.) *Handbook of Agricultural Geophysics*. CRC Press. Boca Ratón, Florida.

ANDERSON-COOK, C. M., ALLEY, M. M., ROYGARD, J. K. F., KHOSLA, R., NOBLE, R. B. & DOOLITTLE, J. A. (2002). *Differentiating soil types using electromagnetic conductivity and crop yield maps*. *Soil Science Society America Journal*, 66: 1562–1570.

DE ASSIS, S., SOARES, J., XAVIER, A.C. & MARTINS, M. (2010). *La variabilidad espacial de atributos químicos de un Oxisol en el cultivo del café*. Rev.Bras. Vol.34 N°1 del suelo Ciênc Viçosa.

BADÍA, D., & MARTÍ, C. (1999). *Suelos del Pirineo central: Fragen*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria Universidad de Zaragoza, Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón e Instituto de Estudios Altoaragoneses. Huesca. 190 pp.

BAEYENS, J. (2000) *Nutrición de las plantas de cultivo*. Versión Española de J. M^a Mateo de Box y P. Urbano. Ed. Lemos. Madrid.

BALAIRÓN RUIZ, L. (1995). *Análisis de la variabilidad espacial y temporal en los procesos meteorológicos*. Ibáñez, j.j. y Machado, c. (Ed). *Análisis de la variabilidad espacio-temporal y procesos caóticos en ciencias medioambientales*. Ed. Geoforma. Logroño. p. 243-258.

BLOOM, P.R. (2000). *Soil pH and pH buffering*. En: SUMNER, M.E. (Ed). *Handbook of soil science*. Boca Raton: CRC Press.

BOWIE, S.H.U. & THORNTON, I. (1985). *Environmental Geochemistry and Health*. Kluwer. Academic Publ. Hingham. M.A.

BRANDSMA, A.S. & KETELLAPPER, R.H. (1979) *Further evidence on alternative procedures for testing on spatial autocorrelation amongst regression disturbances*. Exploratory and explanatory statistical analysis of spatial data (Eds C.P.A.Bartels & R.H. Ketellapper), p. 113–136. Martinus Nijhoff, Hingham, MA.

BUENO, J., AMIAMA, C., HERNANZ, J.L. & PEREIRA, J.M. (2006). *Penetration resistance, soil water content, and workability of grassland soils under two tillage systems*. Transactions of the ASAE, 49: 875-882.

BURGESS, T. M. & WEBSTER, R. (1980). *Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I: The semivariogram and punctual kriging*. J. Soil Sci., 31: 315-331.

BURROUGH. P & WEBSTER, R. (1976.) *Improving a reconnaissance Soil classification by Multivariate Methods*. Journal of Soil Science. 27: 554-571.

CALVO, R., MACÍAS, F. & RIVEIRO, A. (1992). *Aptitud agronómica de los suelos de la provincia de La Coruña*. Diputación Provincial de La Coruña. La Coruña. España. 88pp.

CAMARGO, O.A., MONIZ, A.C., JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.A.S. (1986). *Métodos de análise química y física de solos do Instituto Agronômico Campinas*. Instituto Agronômico, 94pp. (Boletim técnico, 106).

CAMBARDELLA, C.A., MOORMAN, T.B., NOVAK, J.M., PARKIN. T.B., KARLEN, D.L.; TURCO, R.F. & KONOPKA, A.E. (1994). *Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils*. Soil. Sci. Am. J., 58(5):1501-1511.

CANCELA BARRIO, J. (2004). *Gestión integrada del agua en la cuenca alta del Río Miño*. Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela. 574pp.

CARIDAD CANCELA, R. (2002) *Contenido de macro-micronutrientes, metales pesados y otros elementos en suelos naturales de São Paulo (Brasil) y Galicia (España)*. Tesis Doctoral, Universidad de A Coruña (UDC).España. 573p.

CARVALHO, M. P., TAKEDA, E.Y. & FREDDI, O. S. (2003). *Variabilidade espacial dos atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP)*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 27: 695-703.

CASTELAO GEGUNDE, A. & DÍAZ-FIERROS, F. (1992). *Os solos de Terra Chá. Tipos, xénese e aproveitamento*. Publ. Diputación Provincial de Lugo. 166 pp.

CHARTER, R.A., TABATABAI, M.A. & SCHAFE, J.W. (1993). *Metal content of fertilizer marketed in Iowa*. Communications in Soil Science and Plant Analysis 24:961-972.

CLARK, I. (1979). *Practical Geostatistics*. Applied Science Pub., Essex (England). 169 pp.

COBERTERA, E. (1993). *Edafología aplicada*. Ediciones Cátedra. Madrid. 326pp.

COOK, P.G. & WALKER, G.R. (1992) *Depth profiles of electrical conductivity from linear combinations of electromagnetic induction measurements*. Soil Science Society America Journal, Madison, 56: 1015-1022.

CORWIN, D. L. & LESCH, S. M. (2005b). *Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: Part II. Case study*. Computers and Electronics in Agriculture, 46: 135–152.

CORWIN, D. L. & LESCH, S. M., FARAHANI, H.J. (2008). *Theoretical insight on the measurement of soil electrical conductivity*. Allred, B.J, Daniel, J.J. y Ehsani, M.R.(Ed.) Handbook of Agricultural Geophysics. CRC Press. Boca Ratón, Florida.

CORWIN, D.L. & LESCH, S.M. (2005a). *Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture*. Computers and Electronics in Agriculture, 46: 11-43.

CORWIN, D.L., LOAGUE, K. & ELLSWORTH, T.R. (1999). *Assessing non-point source pollution in the vadose zone with advanced information technologies*. Corwin, D.L., Loague, K., Ellsworth, T.R. (Eds.), Assessment of Non-point Source Pollution in the Vadose Zone. Geophysical Monogr. 108. AGU, Washington, DC, USA, pp. 1–20.

COSTA, T.C.C. (1999). *Avaliação de estratégias para classificação de imagens orbitais em mapeamento de uso e cobertura da terra*. Tese (Doutorado) –Universidade Federal de Viçosa.

CRESSIE, N. (1985). *Fitting variogram models using weighted least squares*. J. Mathematical Geology, 17:563:586.

CUESTA, T.S., NEIRA, X.X. & ÁLVAREZ, C.J.. (2010). *Water use efficiency on dairy farms in Galicia, Spain*. International Conference on Agricultural Engineering, Clermont-Ferrand, France.

DAFONTE, J. (1998). *Procesos hidrológicos superficiales en cuencas agrícolas*. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. 238 pp.

DAFONTE, J., ULLOA GUITIÁN, M., PAZ-FERREIRO, J., SIQUEIRA, G.M. & VIDAL VÁZQUEZ, E. (2010). *Mapping of soil micronutrients in an european atlantic agricultural landscape using ordinary kriging and indicator approach*. Bragantia, Campinas, v. 69, Suplemento, p. 175-186.

DAFONTE, J., VALCÁRCEL, M., RAPOSO, J.R., GARCÍA-TOMILLO, A., PAZ GONZÁLEZ, A. & DE ANDRADE, M. (2014). *Parámetros topográficos para la estimación de propiedades físicas del suelo mediante Geoestadística*. VI congreso sobre uso e manejo do solo, Recife (Brasil).

DANTIN CERECEDA, J. (1912). *Resumen fisiográfico de la Península Ibérica*. Trabajos del Museo de Ciencias Naturales 9: 1-275.

DÍAZ, M. A. (2002). *Geoestadística aplicada*. UNAM-CITMA. México. 131 pp.

DÍAZ-FIERROS, F. & GIL SOTRÉS (1984) *Capacidad productiva de los suelos de Galicia*. Universidad de Santiago.

DOMMERGUES, Y. & MANGENOT, F. (1970). *Écologie microbienne du sol*. Paris, Masson et Cie (Ed). 796pp.

DON SCOTT, H. (2000). *Soil Physics Applications. Agricultural and Environmental*. Iowa State University Press. 421 pp.

DUCHAUFOUR, P. *Manual de edafología*. Barcelona:Masson, 1987. 214pp.

FAO-WRB-UNESCO (1998). *World Referencial Base for Soil Resources*. Colección World Soil Resources Reports. Nº 84 FAO-Roma. 88 pp.

FERNÁNDEZ MÁRCOS, M.L., LÓPEZ MOSQUERA, M.E., FUENTES & COLMEIRO, R. (1994). *Los suelos de Galicia, problemas de fertilidad y corrección*. Agricultura: Revista agropecuaria ,742: 388-391.

FRAISSE, C.W., SUDDUTH, K.A. & KITCHEN, N.R. (2001). *Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity*. Trans. ASAE 44 (1), 155–166.

FUENTES YAGÜE, J.L. (2002). *Manual práctico sobre utilización de suelos y fertilizantes*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España. Ediciones Mundi prensa. España. 159 pp.

GABE, U., & RODELLA, A. (1999). *Trace elements in Brazilian agricultural limestones and mineral fertilizers*. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v.30. p.605-620.

GALEA, J., SALGADO, BECERRA, D., MARQUES DA SILVA, J.R., BLANCO, J. PÉREZ, F.J., MORAL, F.J., BASELGA, J.J. & TERRÓN, J.M. (2013). *Estudio de la variabilidad espacial de las condiciones del suelo y su relación con la topografía*. VII congreso ibérico de agroingeniería y ciencias hortícolas. Madrid.

GALLARDO, A. (2006) *Geostadística*. Ecosistemas 15 (3): 48-58. Septiembre.

GALRÃO, E.Z. (2002). *Micronutrientes*. Sousa, D.M.G. de y Lobato, E. (Ed.). Cerrado: correção do solo e adubação. Planaltina-DF: EMBRAPA Cerrados. pp 185-226.

GARCIA AGUILAR (1987). *Caracterización estatigráfica y tectosedimentaria de la Cuenca lignitífera de Meirama (A Coruña)*. Cuadernos Lab. Xeol. Laxe, 11:37-49.

GARCÍA, I., SIMÓN, M., DORRONSORO, C., AGUILAR, J., MARTÍN, F. & ORTIZ, I. (2000). *Contaminación de suelos por oxidación de lodos piríticos*. Edafología 7(3):159-168.

GEONICS (2005). EMD38-DD. *Ground Conductivity Meter-Dual Dipole Version*. Ontario, 34 pp.

GOMES, F.P. (1984). *A estatística moderna na pesquisa agropecuária*. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 160pp.

GOMEZ, A., CANCELA, J.J., NEIRA, X.X., CUESTA, T.S. & DAFONTE, J. (2003). *Metodología para la propuesta de modernización de la Comunidad de Regantes de Río Miño-Río Pequeño*. XXI Congreso Nacional de Riegos. Mérida.

GONZÁLEZ GARCÍA, M. A. (1998). *Propiedades hidrodinámicas en zonas non saturadas e sua relación cos procesos hidrolóxicos*. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. 288 pp.

GOOVAERTS, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press. New York. 483 pp.

GOOVAERTS, P. (1999). *Geostatistics in soil science: state of the art and perspectives*. Geoderma, 89 (1-2):1-45.

GRAÑA, M.J., BARRAL, M.T., GUITIÁN, F.E. & GUITIÁN, F. (1991). *Formas de níquel, cobre y zinc en horizontes superficiales de suelos*. Suelo y Planta 1: 467-48.

GUITIAN OJEA, F. (1956) *Sobre el encalado de los suelos de la zona húmeda*. Bol.Univ.Compostelana. nº64., 73pp.

GUITIAN OJEA, F. (1960) *Efectos del encalado en suelos ácidos*. An. Edaf. Agrob. 19, p 303-314.

GUITIAN OJEA, F. (1981) *Reunión Nacional de suelos*. Itinerario de campo.

GUITIAN OJEA, F. & DIAZ-FIERROS, F. (1967) *Suelos de la zona húmeda española. II. Factores de formación: Clima*. An. Edaf. Agrob. 26: 1467-1485.

GUITIAN OJEA, F., (1967) *Suelos de la zona húmeda española. I. Tipos principales y sus relaciones genéticas*. An. Edaf. Agrob. 26: 1369-1378.

GUITIAN OJEA, F., (1974) *Itinerarios de los suelos de Galicia*. Mon. Universidad de Santiago. 26. 203 pp.

GUITIAN OJEA, F. & CARBALLAS, T. (1982) *Suelos naturales de la provincia de Ourense*. Madrid. CSIC.

GUITIÁN, F. & CARBALLAS, T. (1976). *Técnicas de análisis de suelos*. Ed. Pico Sacro. Santiago de Compostela. 288 pp.

HEINIGER, R.W., MCBRIDE, R.G. & CLAY, D.E. (2003). *Using Soil Electrical Conductivity to Improve Nutrient Management*. Agronomy Journal, 95: 508-519.

HENGL, T. (2009). *A Practical Guide to Geostatistical Mapping*. 2nd. Ed. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 271pp.

HERNÁNDEZ PACHECO, E. (1934). *Síntesis fisiográfica y geológica de España*. Trabajos del Museo Nacional de Ciencias Naturales 38: 1-584.

HEVESI, J., ISTOK, J. & FLINT, A. (1992). *Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics*. Part. I. Structural analysis. *Journal of applied meteorology* 31(7): 661-676.

HOLMGREN, G.G.S, MEYER, M.W., CHANEY, R.L. & DANIELS, R.B. (1993). *Cadmium, lead, zinc, copper, and nickel in agricultural soils of the United States of America*. *J. Environ. Qual.* 22: 335-348.

HOODA, P.S. & ALLOWAY, B.J. (1998). Cadmium and lead sorption behaviour of selected English and Indian soils. *Geoderma* 84:121-134.

HUIJBREGTS, C.J. (1975) *Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data*. Davis, j. c.; Mccullagh, m. j. (ed.). *Display and analysis of spatial data*. New York: John Wiley, p.38-53.

IHOBE (1994). *Guía metodológica de investigación de la contaminación del suelo. Análisis químico*. Propuesta del plan director para la protección del suelo. Gobierno Vasco. Departamento de Urbanismo, vivienda y medio ambiente. Bilbao. 83pp.

INIA (2005) *Metales pesados, materia orgánica y otros parámetros de la capa superficial de los suelos agrícolas y de pastos de la España Peninsular*. I Resultados globales. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaría. Ministerio de Educación y Ciencias: 383 pp.

INSTITUTO GALLEGO DE ESTADÍSTICA (2010) *Censo Agrario 2009*.
Consejería de Economía y Hacienda. Santiago de Compostela.

ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press. New York. 561 pp.

JARAMILLO, D. F. (2011). *El suelo: Origen, Propiedades, Espacialidad*.
Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 553 pp.

JARAMILLO, D. F.; SADEGHIAN, S. & LINCE, L. A. (2012). *Agricultura de precisión en el manejo de la fertilización en el cultivo del café en Colombia*. Informe de año sabático. *Universidad Nacional de Colombia-CENICAFÉ*. Medellín. 71 pp.

JOHANN, J.A., OPAZO, M.A.U., SOUZA, E.G. & ROCHA, J.V. (2004) *Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascave*. PR. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, 8(2-3): p.212-219.

JOHNSON, C.K., DORAN, J.W., DUKE, R.H., WIENHOLD, B.J., ESKRIDGE, K.M. & SHANAHAN, J.F. (2001) *Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition*. *Soil Science Society America Journal*, Madison, 65:1829-1837.

JOLLIFFE, I. T. (1986) *Principal component analysis*. Springer-Verlag. New York.

JOURNEL, A. G., (1986). *Geostatistics, Models and Tools for the Earth Sciences*. Short Course in Geology: Vol. 8, American Geophysical Union, 40pp.

JOURNEL, A.G. & HUIJBREGTS, C.J. (1978) *Mining geoestatistics*. London: Academic Press, 600 pp.

KABATA-PENDIAS, A. (2001). *Trace elements in soil and plants*. CRC Press Boca Ratón, Florida. 413pp.

KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H. (1984). *Trace elements in soil and plants*. CRC Press Boca Ratón, Florida.

KAWASAKI A., KIMURA, R. & ARAI, S. (2000) *Fractionation of trace elements in wastewater treatment sludges*. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 31:2413-2423.

KHATTREE, R., & NAIK D.N. (2000) *Multivariate data reduction and discrimination with SAS software*. SAS Institute Inc. Cary, NC

KORSAETH, A. (2008). Dependence of soil apparent electrical conductivity upon soil texture and ignition loss at various depths in two morainic loam soils in southeast Norway. Allred, B.J, Daniel, J.J. y Ehsani, M.R.(Ed.) *Handbook of Agricultural Geophysics*. CRC Press. Boca Ratón, Florida.

KORSAETH, A., RILEY, H., KVÆRNØ, S.H. & VESTGARDEN L.S. (2008). Dependence of soil apparent electrical conductivity upon soil texture and ignition loss at various depths in two morainic loam soils in southeast Norway. Allred, B.J, Daniel, J.J. y Ehsani, M.R.(Ed.) *Handbook of Agricultural Geophysics*. CRC Press. Boca Ratón, Florida

KREBS, R., GUPTA, S.K., FURRER, G. & SCHULIN, R. (1998). *Solubility and plant uptake of metals with and without liming of sludge-amended soils*. J. Environ. Qual. 27:18-23.

KREIMER, P. (2003). *Las TICs en la agricultura de precisión*, ceditec (centro de difusión de tecnologías ETSIT-UPM).

KRIGE, D. G. (1951). *A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand*. Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, 52: 119-139.

LEE B.D., CARTER B.J. & BASTA N.T. (1997). Weaver B. *Factors influencing heavy metal distribution in six Oklahoma benchmark soils*. Soil Sci.Soc.Am.J. 61, 218-223.

LELOY, E., JAVAUX, M., VANCLOOSTER, M., ROISIN, C. & BIELDERS, C.L. (2011). *Electrical Resistivity in a Loamy Soil: Identification of the Appropriate Pedo-Electrical Model*. Vadose Zone Journal 10: 1023-1033.

LEMA, M.L. (1998). *El análisis de suelos como herramienta de diagnóstico para el abonado racional*. Estación Fitopatológica do Areeiro, Serviço Agrário. Diputación Provincial de Pontevedra. 4pp.

LESCH, S.M., RHOADES, J.D., & CORWIN. D.L. (2000). *The ESAP Version 2.01r user manual and tutorial guide*. Research Report v.146. George E. Brown Jr., Salinity Laboratory, Riverside, CA, 153 pp.

LESCH, S.M., STRAUSS, D.J., & RHOADES, J.D. (1995) *Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques*. 1 Statistical prediction models: a comparison of multiple linear regression and cokriging. Water Resources Research, 3:373–386.

LI, Z. & SCHUMAN, L.M. (1997). *Mehlich-1 and DTPA extractable lead in soils in relation to soil properties*. Commun. Plant anal. 28 (3-5), pp 351-363.

LINDSAY W. L. & NORWELL W. A. 1978. *Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper*. Soil Sci. Soc. Am. J, 42: 421-428.

LÓPEZ MATEO, C., ÁLVAREZ, E. & FERNÁNDEZ MARCOS, M.L. (2002). *Potasio en suelos de Galicia y su relación con la mineralogía*. Edafología, 9(3): 305-312.

LÓPEZ, M.I., MACÍAS, F., GARCÍA, C. & GUITIAN OJEA, F., (1984) *Suelos de la zona húmeda española. X. Suelos sobre serpentinas.3*. Mineralogía. An. Edaf. Agrob. 43: 1055-1075.

MA, L.Q., TANG, F. & HARRIS, W.G. (1997). *Concentration and distribution of eleven metals in Florida soils*. J. Environ. Qual. 26:769-775.

MACÍAS VÁZQUEZ, F. & CALVO de ANTA, R.M. (1992). *Aptitudes Agronómicas de Galicia según criterios edáficos y climáticos*. 100 años de investigación agraria 1888-1988. Xunta de Galicia, p.139-167.

MACÍAS VÁZQUEZ, F. & CALVO de ANTA, R.M. (2001). *Los suelos. Atlas de Galicia*. Medio natural. Xunta de Galicia. Ed Sociedade para o Desenvolvemento Comarcal de Galicia. pp 173-217.

MACÍAS, F. & PUGA PEREIRA, M., GUITIAN OJEA, F., (1978) *Caracteres ándicos en suelos sobre gabros de Galicia*. An. Edaf. Agrob. 37: 187-203.

MADDONNI, G. A., URRICARIET S, GHERSA, C.M. & LAVADO, R.S. (1999). *Assessing soil quality with soil properties and maize growth in the Rolling Pampa*. Agron. J. 91: 280-287.

MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación) (1994). *Métodos oficiales de análisis*. Tomo III. Métodos oficiales de análisis de suelos y aguas para riego Madrid, p. 205-285.

MARDIA, K. V. (1980). *Tests of univariate and multivariate normality*. P.R. Krishnaiah (Ed.). Handbook of Statistics, vol 1, North Holland. p. 279-320.

MARÍN LÓPEZ, A. (2013). *Metodología de evaluación de sostenibilidad en regadío. Aplicación a la zona de Terra Chá (Lugo)*. Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela (USC) 233 pp.

MATHERON, G. (1962). *Traite de Geostatistique Apliquee*, Tome I. Memoires bureau de Recherches Geologiques et Minieres, N 24. Editions Bureau de Recherche et Minieres, Paris. 333pp.

MATHERON, G. (1963). *Principles of Geostatistics*. Economic Geology, v. 58: 1246-1266.

MATHERON, G. (1971). *The theory of regionalized variables and its application*. Les Cahiers du centre de Morphologie Mathématique. Fasc. N° 5. Ecole des Mines de París. 211pp.

MATOS, A.T., FONTES, M.P.F., JORDÃO, C.P. & DA COSTA, L.M. (1996). *Mobility and retention of heavy metals in a red-yellow Latosol*. Revista Brasileira de Ciência do Solo 20: 379-386.

McNEILL, J.D. (1980). *Electrical conductivity of soils and rocks*. Technical Note, TN-5, Geonics Ltda, Ontario, 22 pp.

McNEILL, J.D. (1992) *Rapid, accurate mapping of soil salinity by electromagnetic ground conductivity meters*. P.201-229. In Advances in Measurements of Soil Physical Properties: Bringing Theory Into Practice. SSSA Special Publication 30, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.

MEHLICH, A. (1984) *Mehlich-3 soil test extractant. A modification of Mehlich-2 extractant*. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 15: 1409-1416.

MERMUT A.R., JAIN, J.C., SONG L., KERRICH, R., KOZAK, L. & JANA, S. (1996). *Trace element concentrations of selected soils and fertilisers in Saskatchewan*. Canadian Journal of Environmental Quality 25, 845-853.

MITCHELL, R.L. (1945) *Cobalt and nickel in soils and plants*. Soil.Sci. 60:63-70.

MORTVEDT, J.J. (2000) *Bioavailability of micronutrients*. Sumner. M.E (Ed). Handbook of soil science. CRS Press. Boca Ratón, Florida.

MUÑOZ TABOADELA, M. (1965). *Suelos de Galicia: análisis y necesidades de fertilizantes con especial referencia al fósforo*. Monografías Ecológicas y Agrarias 1 G.S.I.C.

NAVARRO BAYA, S. & NAVARRO GARCÍA, G. (2000). *Química Agrícola: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. Ediciones Mundi-Prensa. 488 pp.

OLIVER, M. & WEBSTER, R. (2014). *A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging*. Catena, 113, 56–69.

OFFICER, S. J., KRAVCHENKO, A., BOLLERO, G.A., KITCHEN, N.R., WIEBOLD, W.J, PALM, H.L. & BULLOCK, D.G. (2004) *Relationships between soil bulk electrical conductivity and the principal component analysis of topography and soil fertility values*. Plant and Soil, vol. 258, no. 1-2, p. 269–280.

PARDO, M.T. (1997). Influence of electrolyte on cadmium interaction with selected andisols and alfisols. Soil Sci. 162:733-740.

PAZ-GONZÁLEZ, A., GÓMEZ, M.J. & TABOADA, M.T. (1996). *Análisis geoestadístico de las propiedades generales de un suelo de cultivo*. Invest. Agr.Prod. Veg., 11(1): 133-160.

PAZ-GONZÁLEZ, A., TABOADA CASTRO, M.T. & VIEIRA, S.R., (2001). *Geostatistical analysis of heavy metals in a one-hectare plot under natural vegetation in a serpentine area*. Can.J.Soil.Sci.,81: 469-479.

PAZ-GONZÁLEZ, A., VIEIRA, S.R., TABOADA CASTRO, M.T. (2000). *The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon*. Geoderma, 97: 273-292.

PEBESMA, E., & GRÄLER, B. (2014). *Spatio-temporal geostatistics using gstat*.

PEREZ DE CIRIZA GAINZA, J.J., (2001). *Agricultura de precisión*, ITGA. Navarra Agraria. p. 9-13.

PLASTER, E.J. (2000). *La ciencia del suelo y su manejo*. Ed. Paraninfo. 419 pp.

PORTA, J., LÓPEZ-ACEVEDO, M. & ROQUERO, C. (2003). *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3ª Edición. Mundi-Prensa. 929 pp.

PORTA, J.; LÓPEZ-ACEVEDO, M. & ROQUERO, C. (1999). *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*. Ed. Mundi-prensa. Madrid. 849 pp.

RAIJ, B. VAN, ANDRADE, J.C., CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. (2001) *Análise química para avaliação da fertilidade de solo tropicais*. Campinas: Instituto Agronômico, 285 pp.

REY, J., OVALLES, F. (2001). *Efecto de técnicas exploratorias de los datos en estimaciones Kriging de propiedades del suelo*. *Agronomía Trop.* 51:81-106.

ROVERS, H, CAMARGO, O.A. & ANDRADE, J.M. (1983) *Níquel total e solúvel em DTPA em solos do Estado de São Paulo*. *R.bras. Ci. Solo.* 7:217-220.

ROWELL, D.L. (1994). *Soil Science: Methods y Applications*. Ed. Logman Scientific & Technical. England. 350 pp.

SAMOUËLIAN, A., COUSIN, I., TABBAGH, A., BRUAND, A. & RICHARD, G. (2005). *Electrical resistivity survey in soil science: a review*. *Soil and Tillage Research* 83: 173-193.

SAMPER, F.J., CARRERA, J. (1990). *Geoestadística. Aplicaciones a la Hidrogeología Subterránea*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 263 pp.

SANDE FOUZ, P., MIRÁS AVALOS, J.M. & VIDAL VÁZQUEZ, E. (2007). *Oscilación temporal del contenido de Ca, Mg, K y Na soluble en una cuenca agroforestal de Galicia atlántica (España)*. *Anais do II Simposio Internacional del Manejo de Microbacias Hidrográficas*.

SCHACHTSCHABEL P., BLUME H.P., BRÜMMER G., HARTGE K.H. & SCHWERTMANN U. (1992): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart: 491pp.

SCHUELLER, J.K. (2000). *A Agricultura de precisão: visão externa. O estado da arte da agricultura de Precisão nos Estados Unidos*. Balastreire, L. A. (Ed.) O estudo da arte da agricultura de precisão no Brasil. ESAQ-USP. Piracicaba, p. 8-16.

SIQUEIRA, G. (2009). *Medida de la conductividad eléctrica aparente del suelo por inducción electromagnética y variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo*. Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela (USC) 181 pp.

SIQUEIRA, G. M., VIEIRA, S.R. & CAMARGO, M.B.P. (2008a) *Variabilidade espacial do armazenamento e da perda média diária de água pelo solo no sistema de semeadura direta em Campinas, SP*. *Bragantia*, 67(1): 213-223.

SIQUEIRA, G.M., VIEIRA, S.R. & CEDDIA, M.B. (2008b) *Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos*. *Bragantia*, 67(1): 203-211.

SOLTANPOUR, P.N., KHAN, A. & LINDSAY, W.L. (1976). *Factors affecting DTPA-extractable Zn, Fe, Mn and Cu from soils*. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 7(9):797-821.

SOUZA, Z.M., MARQUES JÚNIOR, J. & PEREIRA, G.T. (2004). *Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana de açúcar*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, n.6, p. 937-944.

SPAC (Soil and Plant Analysis Council). (1992). *Handbook on reference methods for soil analysis*. USA. 202 pp.

SPSS (2009). *PASW Statistics for Windows*. Version 18.0. Chicago.

STURARO, J.R. (1993) *Mapeamento geoestatístico de propriedades geológicogeotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento*. Tese (Doutorado)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SUDDUTH, K.A., DRUMMOND, S.T. & KITCHEN, N.R. (2001). *Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31: 239-264.

SUDDUTH, K.A., KITCHEN, N.R. & DRUMMOND, S.T. (1999). *Soil conductivity sensing on claypan soils: comparison of electromagnetic induction and direct methods*. *Proceedings of the Fourth International Precision Agriculture Conference*, 19-22 July 1998, St Paul, Minnesota (American Society of Agronomy, 677 South Segoe Road, Madison, Wisconsin), p. 979-990.

SUDDUTH, K.A., KITCHEN, N.R., WIEBOLD, W.J., BATCHELOR, W.D., BOLLERO, G.A., BULLOCK, D.G., CLAY, D.E., PALM, H.L., PIERCE, F.J., SCHULER, R.T. & THELEN, K.D. (2005). *Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the North-Central USA*. *Comp. Electron. Agric.* 46:263–283.

SUMMER, M. (2000). *Beneficial use of effluents, wastes, and biosolids*. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 31:1701-1715.

SWAINE, D.J. & MITCHELL, R., (1960) *Trace-element distribution in soil profiles*. *J. Soil. Sci.* Vol.11. p 347-368.

TABOADA CASTRO, M.T. (2002). *Determinación de metales pesados por fluorescencia de Rayos-X y digestión con agua regia en suelos de huerta en Galicia*. IV congreso de la sociedad española de la ciencia del suelo. Lleida. p. 87-92.

TAKAI, Y., & KAMURA, T. (1966) *The mechanism of reduction in waterlogged paddy soil*. Folia Microbiol 11: 304-313.

TAYLOR, R.W., XIU, H., MEHADI, A.A., SHUFORD, J.W. & TADESSE, W. (1995). *Fractionation of residual cadmium, copper, nickel, lead, and zinc in a previously sludge-amended soil*. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 26:2193-2204.

TERRÓN LÓPEZ, J.M. (2013). *Delimitación de zonas de manejo en agricultura de precisión a partir de medidas de conductividad eléctrica aparente del suelo mediante el uso de sensores móviles de contacto*. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba (UCO) 122 pp.

THOMAS, G.W. (1996). *Soil pH and soil acidity*. Sparks, D.L. (Ed.) Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Soil Science Society of America, Madison, WI. p. 475-490.

THOMPSON, L. & TROEH, F. (1982). *Los suelos y su fertilidad*. 4a Ed. Editorial Reverté, S.A, España. 649 pp.

THOUGH, J.G. & LEYSHON, P.R. (1985). *SPHINX – A progma to fit spherical and exponential models to experimental semivariograms*. Computers and Geosciences, 11(1):95-99.

TRAGSA (2009) Terra Chá. 5p. Aceso en 20 de junio de 2009: <http://redrural.tragsatec.es/redrural/fichas/GA11.pdf>

TRANGMAR, B.B., YOST, R. S. & WEHARA, G. (1985), *Application of geostatistics to spatial studies of soil properties*. *Advances in agronomy*, 28: 45-94.

TYLER, L.D. & MCBRIDE, M.B. (1982). Mobility and extractability of cadmium, copper, nickel and zinc in organic and mineral soil columns. *Soil Sci.* 134:198-205.

ULLOA GUITIÁN, M. (2002) *Aplicación de la geoestadística al estudio de la fertilidad del suelo*. Tesis Doctoral, Universidad De A Coruña (UDC). España. 440 pp.

URBANO TERRÓN, P (1999) *Tratado de fitotecnia general*. 2ª edición. Ed. Mundi – Prensa. 895 pp.

USDA (1975). *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. *Agric. Handbook 436*. 754 pp.

USDA (United States Department of Agriculture) (1999). *Soil Quality Test Kit Guide*. Washington, DC. 88 pp.

VALCÁRCEL, M., RAPOSO, J.R., DAFONTE, J., da SILVA DIAS, R., VIDAL VÁZQUEZ, E. & PAZ GONZÁLEZ, A., (2013). *Multifractal characteristics of vertical and horizontal apparent electrical conductivity measured along replicated transects*. *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*. Vol XI.

VAN BREEMEN, N. & BUURMAN, P. (1998). *Soil Formation*. Dordrecht: London : Kluwer Academic, cop. 377 pp.

VIEIRA, S.R. (2000). *Uso de geoestatística em estudos de variabilidade espacial de propriedades do solo*. In: NOVAIS, R.F. (Ed.). *Tópicos em Ciência do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa. p.3-87.

VIEIRA, S.R., HATFIELD, J.L., NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. (1983). *Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties*. *Hilgardia*, 51: 1-75.

WANDER, M.M. & G.A. BOLLERO. (1999). *Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois*. *Soil Science Society of America Journal* 63:961-971.

WARRICK, A. W., MYERS, D. E. & NIELSEN, D. R. (1986). *Geostatistical methods applied to soil science*. A. Klute (Ed.). 2nd ed. *Methods in soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods*. Agronomy 9. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI, USA. p. 53-82.

WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. (1980) *Spatial variability of soil physical properties in the field*. Hillel, d. *Applications of soil physics*. New York: Academic Press.

WEBSTER, R. & OLIVER, M. (2007). *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley and Sons: Chichester.

WHITE, R. E. (2000). *Principles and practice of soil science*. The soil science. The soils a natural resource. Blackwell Science. 348 pp.

WIENHOLD, B.J. & DORAN, J.W., (2008). *Apparent electrical conductivity for delineating spatial variability in soil properties*. Allred, B.J, Daniel, J.J. y Ehsani, M.R (Ed.) *Handbook of Agricultural Geophysics*. CRC Press. Boca Ratón, Florida.

WU, Q., HENDERSHOT, W.H., MARSHALL, W.D. & GE, Y. (2000). *Speciation of cadmium, cooper, lead, and zinc in contaminated soils*. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 31.

XUNTA DE GALICIA (2002) *Plan espacial de protección civil ante o risco de inundación en Galicia*. Consellería de Xustiza, Interior e Administración Local. 219 pp.

YANG, P., YANG, M., MAO, R. & SHAO, H. (2014). *Multivariate-Statistical Assessment of Heavy Metals for Agricultural Soils in Northern China*. The Scientific World Journal. Volume 2014. 7 pp.

