

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

**Estudio de la homogeneidad del suelo Osorno mediante la variabilidad
del aluminio extractable utilizando geoestadística**

Tesis presentada como parte de los
requisitos para optar al grado de
Licenciado en Agronomía.

Angélica Paulina Díaz Gallardo

VALDIVIA – CHILE

2006

FIRMA

PROFESOR PATROCINANTE

Roberto Mac Donald H.

Ing. Agr., M. Sc.

PROFESOR COPATROCINANTE

Dante Pinochet T.

Ing. Agr., M. Sc. Ph D.

PROFESORES INFORMANTES:

Juan Nissen M.

Ing. Agr., Dr. rer. hort.

INSTITUTO DE INGENIERIA AGRARIA Y SUELOS

Dedicado a Luis Díaz M. (mi padre)
por siempre entregarme lo mejor, gracia.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a las personas que mas me han apoyado en todo este camino recorrido y siempre, mi familia, en especial a mis padres por siempre estar a mi lado, gracias por el cariño y la preocupación que siempre me entregan.

Agradecer a mi profesor patrocinante Roberta Me Donald, y al profesor Dante Pinochet. Al profesor Me Donald por el apoyo, amistad y la confianza depositada en mi y al profesor Pinochet por siempre creer en mi, además de aprovechar de decir que fue un agrado el ser su alumna. Gracias a los dos.

Quiero agradecer también a las personas que me ayudaron en la realización de la tesis, como Claudia que me ayudo en toda la etapa de laboratorio y a Ricardo por ayudarme a escribir la tesis, gracias por tus correcciones y por tu paciencia. Y por ultimo también agradecer a todas las personas que de una u otra forma me ayudaron a terminar la tesis y esta etapa.

Gracias a todos por que sin la ayuda de ustedes no podría haber terminado esto.

ÍNDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	INTRODUCCION	1
2	REVISION BIBLIOGRAFICA	4
2.1	Suelos de cenizas volcánicas	4
2.1.1	Clasificación taxonómica de suelos de cenizas volcánicas	4
2.1.1.1	Andepts	4
2.1.2	Andisol	5
2.1.3	Andisols del sur de Chile	6
2.1.3.1	Características físicas de los Andisols de Chile	7
2.1.3.2	Características químicas de los Andisols de Chile	8
2.1.3.3	Características mineralógicas de los Andisols de Chile	9
2.2	Serie Osorno	10
2.2.1	Ubicación	10
2.2.2	Mineralogía de la serie Osorno	10
2.2.3	Características químicas	10
2.2.4	Características físicas	10
2.3	Aluminio en el suelo	12
2.3.1	Aluminio extractable	13
2.3.2	Determinación de aluminio extractable en acetato de amonio pH 4,8	14
2.4.	Variabilidad y dependencia espacial	14
2.4.1	Variabilidad sistemática	16
2.4.2	Variabilidad aleatoria	16
2.5	Estadística descriptiva	17
2.5.1	Media	17
2.5.2	Varianza y Desviación estándar	18
2.5.3	Coficiente de variación	18
2.5.4	Distribución normal	19
2.5.4.1	Coficiente de simetría o Skewness	19

Capítulo		Página
2.5.4.2	Coeficiente de kurtosis	20
2.6	Análisis Geoestadístico	21
2.6.1	Geoestadística	21
2.6.2	Variable regionalizada y funciones aleatorias	22
2.6.2.1	Estacionaridad	23
2.6.3	Análisis de dependencia espacial	24
2.6.3.1	La semivarianza	25
2.6.3.2	Covarianza y autocorrelación	25
2.6.3.3	Semivariograma	27
2.6.3.3.1	Rango de dependencia espacial	29
2.6.3.3.2	Umbral	29
2.6.3.3.3	Efecto o varianza nugget	29
2.6.4	Tipos de semivariogramas	31
2.6.4.1	Modelo esférico	31
2.6.4.2	Modelo exponencial	32
2.6.4.3	Modelo gaussiano	32
2.6.4.4	Modelo lineal	32
2.6.5	Isotropía y anisotropía	34
2.6.6	Estimación o predicción Kriging	35
2.7	Aplicaciones de la geoestadística	37
3	MATERIAL Y MÉTODO	39
3.1	materiales	39
3.1.1	Área de muestreo	39
3.1.2	Materiales de muestreos	39
3.1.3	Materiales utilizados en el secado de muestras y laboratorio	39
3.1.4	Programas computacionales	39
3.2	Método	40
3.2.1	Método de muestreo	40
3.2.2	Determinación de aluminio extractable	40

Capítulo		Página
3.2.3	Análisis estadísticos	41
3.2.3.1	Análisis estadístico tradicional	41
3.2.3.2	Análisis geoestadísticos	41
3.2.4	Análisis de superficie	42
4	PRESENTACIÓN RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
4.1	Análisis estadístico descriptivo	43
4.1.1	Promedio y media, máximo y mínimo	43
4.1.2	Varianza y desviación estándar	44
4.1.3	Coefficiente de variación	44
4.1.4	Coefficiente de simetría y kurtosis	45
4.2	Análisis geoestadísticos	48
4.2.1	Semivariograma isotrópico	48
4.2.2	Análisis de anisotropía	49
4.2.3	Semivariograma anisotrópico	49
4.2.3.1	Modelo	50
4.2.3.2	Rango de dependencia espacial	51
4.2.3.3	Efecto nugget	53
4.2.3	Correlogramas	54
4.3	Análisis de superficie	58
5	CONCLUSIONES	62
6	RESUMEN	63
	SUMARY	65
7	BIBLOGRAFIA	67
	ANEXOS	73

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Resumen de las características químicas y físicas de la serie Osorno	11
2	Parámetros estadísticos para el aluminio extractable para dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm).	46
3	Parámetros geoestadísticos para aluminio extractable para dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm)	50
4	Análisis de Moran de aluminio extractable para la profundidad de 0-10 cm	56
5	Análisis de Moran de aluminio extractable para la profundidad de 10-20 cm	57

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Autocorrelograma, relación entre la distancia de separación (retrazo) y la autocorrelación	27
2	Modelo de semivariograma, relación entre la distancia de separación de las muestras y la semivarianza	28
3	Efecto nugget, ausencia total de dependencia espacial entre las muestras	30
4	Semivariogramas experimentales y modelos de varianza	33
5	Histogramas de frecuencia para aluminio extractable en dos profundidades, 0-10 cm y 10-20 cm	47
6	Semivariogramas ajustados de Al extractable para dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm)	52
7	Correlogramas para Al extractable a dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm)	55
8	Mapa de contorno para Al extractable a la profundidad de 0-10 cm	60
9	Mapa de contorno para Al extractable a la profundidad de 10-20 cm	61

INDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Mapa de distribución de los puntos muestreados dentro de la serie Osorno para las profundidades de 0-10 cm y de 10-20 cm.	74
2	Semivariogramas isotrópicos para Al extractable en dos profundidades, 0-10 cm y 10-20 cm	75
3	Parámetros geoestadísticos para semivariograma isotrópico de Al extractable para dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm)	76

1 INTRODUCCIÓN

El suelo es un cuerpo heterogéneo. Por ello, para definir un suelo se requiere establecer sus límites, los cuales son producto de la influencia de los efectos producidos por sus factores formadores, resultando, en teoría, en una morfología única. La acción de los procesos dinámicos de los factores formadores de suelo originan caracteres bien definidos, los cuales son observables en la morfología del perfil. Es así como los suelos se diferencian según sus propiedades, las cuales son cuantificadas y calificadas en sus horizontes.

De las propiedades definitorias de suelos, las características químicas y físicas de los suelos, presentan una gran heterogeneidad producto de la acción de los factores formadores de suelo y de la intervención antrópica. Algunos factores pueden actuar a grandes escalas y durante largos períodos de tiempo, tales como la erosión geológica y la acción del clima, en tanto otros factores pueden afectar más localmente y con mayor frecuencia, tales como la acción antrópica y las depositaciones locales de material parental. Su acción conjunta, induce variabilidad en las propiedades que definen a un suelo. La variabilidad que presentan las propiedades del suelo ha llevado a realizar estudios detallados de su efecto intrínseco, que permita una predicción e interpretación correcta de su importancia y efecto en las propiedades de un suelo en área determinada. Una herramienta útil desarrollada para el estudio y evaluación de la variabilidad es la geoestadística, la cual permite conocer la estructura de la variación de una propiedad del suelo, tanto en propiedades químicas, físicas, biológicas y morfológicas de un suelo.

El análisis de la distribución espacial de propiedades permanentes y atributos de un suelo pueden ayudar a caracterizar a un suelo en sus límites e influencia espacial, de forma tal que permita escalar la influencia de algún parámetro estudiado en forma puntual en un suelo. El aluminio extractable en acetato de amonio a pH 4.8 parece ser una variable que representa varias propiedades de los suelos, especialmente en suelos derivados de materiales volcánicos, De esta forma, el estudio de la variabilidad espacial

del aluminio extractable en suelos derivados de materiales volcánicos, podría ser una herramienta determinante al momento de definir áreas homogéneas, especialmente a nivel de serie de suelo, ya que el Al extractable se relaciona con el contenido y tipo de arcillas presentes en el suelo.

La serie de suelo Osorno, es una de las más extensas de la X Región. Estudios morfológicos previos han mostrado diferencias importantes entre pedones presentes en este suelo, que hacen suponer la presencia de más de un suelo asociado en la serie Osorno. Recientemente en un estudio de la variabilidad del Al extractable en una serie reconocidamente como homogénea (serie Pelchuquín), ha mostrado que esta variable permitió definir adecuadamente la serie, ya que no mostró dependencia espacial en el área estudiada en el análisis geoestadístico de la variable. Ello permite suponer que esta variable aplicada a un suelo más heterogéneo en sus materiales formadores puede evidenciar la presencia de diferentes tipos de suelos y establecer la necesidad de un replanteamiento de la homogeneidad de la serie de suelo Osorno.

Por ello, el objetivo principal de este trabajo es determinar si existe homogeneidad de la serie Osorno, a través de la evaluación de su variabilidad y dependencia espacial, utilizando parámetros geoestadísticos en la variable Aluminio extractable.

Los objetivos específicos son:

Evaluar a través de estadística descriptiva la variabilidad del Aluminio extractable en dos profundidades de suelo 0-10 cm y 10-20 cm.

Determinar la dependencia espacial y sus características en muestras de suelos recolectadas a través de transectos en la serie Osorno distanciados a 2 km aproximadamente.

Determinar el sentido de la variabilidad espacial y evaluar si obedece a algún factor formador de suelo, tal como material parental a través del Al extractable.

2 REVISIÓN BIBLOGRAFICA

2.1 Suelos derivados de cenizas volcánicas.

El término suelos derivados cenizas volcánicas, es comúnmente usado para designar suelos formados a partir de materiales piróclásticos y tefras (expulsiones volcánicas) (SHOJI *et al.*, 1993). En Chile, ocupan una superficie importante de los suelos agrícolas chilenos. Los suelos derivados de cenizas volcánicas, representan un 50 a 60% del total de las 5.400.000 ha de suelos arables disponibles en el país. En estos suelos se desarrolla la gran parte de la producción cerealera y ganadera y una parte apreciable del establecimiento de bosques y plantaciones forestales (TOSSO, 1985).

Los suelos de cenizas volcánicas están representados por los suelos trumaos, ñadis y rojos arcillosos, cubriendo un superficie de alrededor de cuatro millones de hectáreas entre los paralelos 35 y 34 latitud sur (ALAMOS *et al.*, 1967). Además de un origen común, presentan propiedades singulares, que los diferencian de los suelos derivados de otros materiales. Se han definido como de una densidad aparente baja (menor a 0.85 g cm^{-3}), alto contenido de materia orgánica y complejos coloidales minerales dominados por formas activa de Al y Fe (SHOJI *et al.*, 1993; TOSSO, 1985).

2.1.1 Clasificación taxonómica de suelos de cenizas volcánicas. Los suelos derivados de cenizas volcánicas inicialmente fueron clasificados en Chile como parte de los órdenes Ultisol, Alfisol e Inceptisol. En el orden Inceptisol fueron incluidos como un suborden específico, Andept (SOIL SURVEY STAFF, 7ª APROXIMACIÓN, 1960). Los suelos del suborden Andepts, dadas sus características singulares fueron finalmente introducidos dentro de la Taxonomía de Suelos como un orden, denominado Andisol (SHOJI, 1993; SOIL SURVEY STAFF, 1975).

2.1.1.1 Andepts. Según SOIL SURVEY STAFF (1975) Andepts, designa a un grupo de suelos que provienen de materiales parentales piroclásticos y que pueden presentar

características derivadas de un proceso de formación propio, denominado ándico. Estas características se derivarían de los complejos húmicos y minerales formados, las cuales se han determinado en una baja densidad aparente, una apreciable cantidad de arcilla alofán, una alta capacidad de intercambio catiónico a pH 7.0 y una alta capacidad de retención de fósforo. Normalmente, excepto en cenizas muy recientes, el porcentaje de carbono orgánico en los Andepts es alto, siendo en algunos suelos más que el 18% de su peso seco (SOIL SURVEY STAFF, 1975; BRADY y WEIL, 2000).

Los Andepts, se encuentran principalmente en regiones del mundo donde existen volcanes, lo cual a su vez se asocian a zonas tectónicas del planeta, en montañas y cercanos a ellas, las cuales han tenido actividad volcánica. Estos suelos se encuentran presentes desde el ecuador hasta latitudes altas, en América, y excepcionalmente se encuentran en las regiones del oeste de Estados Unidos, al norte de California, en América del Norte (SHOJI; *et al.*, 1993; TOSSO, 1985). A pesar de que muchos Andepts, son formados a partir de cenizas volcánicas, algunos han sido formados a partir de otras rocas piroclásticas, rocas sedimentarias, o rocas ígneas intrusivas básicas (SOIL SURVEY STAFF, 1975). La mayoría de los Andepts, probablemente presentan algún contenido de vidrio en su composición, siendo este rápidamente meteorizado en climas húmedos.

En 1978, Guy Smith propone la reclasificación de los Andepts. En su proposición, enumera una serie de defectos presentados en la clasificación del suborden Andepts (establecida en 1975 en el Soil Taxonomy) y desarrolla un análisis razonado para el establecimiento de un nuevo orden, llamado Andisol (SHOJI *et al.*, 1993).

2.1.2 Andisol. El nuevo orden Andisol, aceptado en 1985 (SOIL SURVET STAFF, 1990) se basa en un concepto central, de ser un suelo desarrollado a partir de cenizas volcánicas, pumicíticas u otras expulsiones volcánicas o materiales volcánicos. Estos suelos presentan un complejo intercambiable, que es dominado por compuestos amorfos de aluminio, silicio y humus o por una matriz dominada por cristales, presentando uno o

más horizontes de diagnóstico con propiedades ándicas (Leamy *et al.*, 1988 citado por SHOJI *et al.*, 1993). Posteriormente, se adicionó al orden como elemento característico la presencia de un elevado contenido de vidrio o fragmentos impregnados con vidrios. El vidrio, conjuntamente con el olivino poco alterado, piroxenos y elevadas cantidades de plagioclasa, señalan claramente la juventud de estos depósitos (TOSSO, 1985).

Una característica de los Andisols, es la presencia de un único ensamblaje del mineral de arcilla, dominados por componentes no cristalinos. Dentro de los materiales no cristalinos de los suelos de cenizas volcánicas se incluyen: alofán, igozolita, opalina, silicatos de opalina y hierro hidratado. Estos materiales, no pueden ser definidos como minerales cristalinos, porque no muestran una composición química fija o una estructura tridimensional regular (SHOJI *et al.*, 1993).

Lo suelos de cenizas volcánicas o Andisols, están entre los suelos de mayor productividad en el mundo. Concentrándose en ello, un alta densidad poblacional (SHOJI *et al.*, 1993). Las propiedades químicas y físicas de los suelos de cenizas volcánicas influyen en su productividad de variadas maneras. Por lo cual, se ha indicado que es necesario la exacta y extensiva información de estas propiedades para desarrollar programas de mejoramiento de la productividad, utilización sustentable y conservación de estos suelos (SHOJI *et al.*, 1993).

2.1.3 Andisols del sur de Chile. La distribución de los Andisols se inicia en la VI Región, con la presencia de los suelos denominados trumaos (TOSSO, 1985). Hacia el sur del país, aumentan su extensión y frecuencia, especialmente en la precordillera de los Andes, llegando a formar un manto continuo alrededor de los 36° 30' L. S. En la depresión central, existen formaciones aisladas de trumaos que se van desarrollando paulatinamente hacia el sur, hasta que toda la superficie entre ambas cordilleras está cubierta con estos suelos. Más al sur comienzan aparecer los suelos ñadis, que son suelos derivados de cenizas volcánicas en topografías planas.

Todos los suelos volcánicos chilenos: trumaos, rojos arcillosos, pardos arcillosos, ñadis, son suelos derivados de arenas volcánicas y suelos pumicíticos que provienen de materiales piróclásticos incluyendo cenizas, arenas, pómez o formas transportadas de estos materiales: aluvium o eolium (TOSSO, 1985). En el sur de Chile, los suelos más característicos derivados de cenizas volcánicas son denominados trumaos, los cuales son suelos formados a partir de cenizas volcánicas modernas y se encuentran sobre posición plana, de lomaje y de cerro. (TOSSO, 1985). Estos suelos derivan de cenizas volcánicas de tipo andesítico basáltico, las cuales fueron depositadas sobre diversos tipos de substratos, presentan, una topografía compleja que va desde terrenos planos a escarpados, con predominio de lomajes ligeros a moderadamente ondulados (INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACION DE RECURSOS NATURALES Y UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE (IREN- UACH), 1978).

Los trumaos de la Décima Región, no constituyen un conjunto coetáneo y sus edades parecen fluctuar desde suelos recientes a suelos de edad ártica. Estos suelos, pueden presentar diferencias en el contenido y la composición de las arcillas, pudiéndose encontrar, aparte del alofán, arcillas como imogolita, metahaloisita, esmectitas y otras especies relacionadas directamente a la edafogénesis y evolución de los suelos (BESOAIN y SEPULVEDA, 1981).

2.1.3.1 Características físicas de los Andisols de Chile. En la mayoría de los suelos, se observa en los horizontes superficiales colores pardos muy oscuros, pardos oscuros y pardo grisáceos muy oscuros. Los subsuelos presentan colores pardos amarillentos y rojos amarillentos (IREN- UACH, 1978). La superficie generalmente presenta, una textura franca a franca arcillosa, la que se hace más fina en profundidad (IREN- UACH, 1978). Además, presentan una agregación generalmente subangular a granular media y moderadamente o fuerte en los horizonte superiores (IREN- UACH, 1978).

La velocidad de infiltración es moderadamente alta a muy alta. La rápida infiltración que caracteriza a los trumaos tiene importancia en su manejo, a lo que se

suma la alta estabilidad mecánica de sus agregados debido a la naturaleza de sus diversos tipos de arcillas, agentes cementantes y el gran efecto estabilizante del agua. Esto los hace, además, bastante resistentes a la erosión hídrica (IREN- UACH, 1978). Además, la alta porosidad y agregación que presentan estos suelos, hacen que tengan una capacidad de retención de humedad alta (IREN- UACH, 1978).

En los trumaos la densidad real es baja, lo que se explica por los altos contenidos de materia orgánica y predominios de materiales minerales inorgánicos livianos (IREN- UACH, 1978). Por su parte, la densidad aparente es baja, debido principalmente a la presencia de coloides inorgánicos, que imparten una alta porosidad y alta agregación. También, a sus altos niveles de materia orgánica y a la presencia de cantidades de minerales livianos, factores que determinan valores que van desde 0.53 a 0.77 g cm^{-3} (IREN- UACH, 1978).

2.1.3.2 Características químicas de los Andisols de Chile. En general, presentan una reacción fuertemente ácida a ligeramente ácida, predominando los pH ácidos (IREN- UACH, 1978). Poseen una capacidad de fijación de fósforo extremadamente alta, que en los trumaos más jóvenes es mayor, debido a que el alofán ha evolucionado en los suelos más antiguos a formas criptocristalinas y/o cristalinas y los niveles de aluminio son inferiores (IREN- UACH, 1978). Los niveles de materia orgánica total y oxidable son muy altos y disminuyen bruscamente en profundidad. Como es usual, en las primeras etapas de desarrollo de los Andisoles se estimula una gran acumulación de materia orgánica que, a menudo, sobrepasa el 15% de carbono y que ha sido considerada la causa de la estabilización del aluminio liberado por meteorización de las cenizas volcánicas, formándose un complejo humus-aluminio, lo cual retarda la degradación de la materia orgánica (IREN- UACH, 1978).

El nivel de nitrógeno orgánico en los horizontes superiores es medio a alto y disminuye en profundidad. La capacidad de intercambio de cationes y aniones es alta en todo el perfil (IREN- UACH, 1978). Los contenidos de fierro y aluminio de intercambio

y/o extractables son altos en la superficie y aumenta considerablemente en profundidad. Siendo los niveles de aluminio intercambiable indicadores de algún grado de toxicidad en ciertos suelos (IREN- UACH, 1978).

2.1.3.3 Características mineralógicas de los Andisols de Chile. La característica mineralógica más relevante de estos suelos es la presencia de alofán, arcilla amorfa a los rayos X, que predomina en el complejo coloidal inorgánico e imparte a estos suelos propiedades químicas y físicas definidas (IREN- UACH, 1978). El alofán, posee una alta capacidad de retención de agua, una alta superficie específica, alto coeficiente de fijación de fósforo y una gran afinidad por sustancias húmicas. Imparte al suelo una estructura porosa, induce una alta permeabilidad y predispone a una lixiviación considerable (IREN- UACH, 1978).

El alofán se ha formado, fundamentalmente, por alteración de los vidrios volcánicos, mediante hidratación e hidrólisis y posterior precipitación o co-precipitación del hidrolizado resultante, conteniendo iones hidratados de silicio y aluminio, a través, probablemente, de un protoalofán. Investigaciones de Wada *et al.* (1979) señalan que el vidrio de alofán se formaría en ambientes cerrados, de modo que la hidrólisis se realizaría a concentraciones elevadas de Si y a pH alcalino (BESOAIN y SEPULVEDA, 1981).

Las cenizas volcánicas que han dado origen a los trumaos, son materiales altamente fragmentados y la mayor parte de sus componentes presentan gran susceptibilidad a la meteorización, debido a su gran labilidad y alta superficie específica, especialmente el vidrio volcánico, que es su componente mayoritario. Estas cenizas, han sido transportadas en forma eólica o hídrica y depositadas o estratificadas sobre actuales substratos, formando sistemas permeables de alta velocidad de infiltración, altamente porosos y capaces de retener una gran cantidad de agua (IREN- UACH, 1978).

2.2 Serie Osorno.

La serie Osorno ha sido definida desde finales de los años 1950 (DIAZ y RAY *et al.*, 1960; RAY, 1958). Los suelos de esta serie, son suelos derivados de cenizas volcánicas que se depositaron sobre planos fluvioglaciales. Presentan una topografía compleja, con pendiente dominante de 2 a 5% (IREN- UACH, 1978).

2.2.1 Ubicación. Los suelos de esta serie están ubicados en las provincias de Osorno y Valdivia, ocupando una superficie de 18.808 ha (IREN- UACH, 1978).

2.2.2 Mineralogía de la serie Osorno. A través de todo el perfil se encuentra alofán de tipo A y AB. En la superficie, es posible observar una alta contaminación con sílice amorfa, alfacristobalita y plagioclasa con una ausencia total de minerales secundarios (IREN- UACH, 1978).

2.2.3 Características químicas. Son suelos ácidos en superficie haciéndose neutros en profundidad (IREN- UACH, 1978). En general, se trata de suelos que poseen bajos niveles de elementos nutritivos disponibles. Se observan valores bajos de fósforo aprovechables, situación que se agudiza en los horizontes inferiores debido a la alta capacidad de retención de fósforo, en tanto presentan valores altos de aluminio y fierro extractables (IREN- UACH, 1978). Los niveles de materia orgánica son muy altos en superficie y disminuyen gradualmente en profundidad (IREN- UACH, 1978).

2.2.4 Características físicas. Son suelos profundos que presentan colores pardos muy oscuros en superficie a pardo oscuro a pardo amarillento en profundidad; textura moderadamente fina en superficie, a fina en profundidad; son suelos bien estructurados, con estructura granular en superficie y subangular en profundidad; presentan una consistencia suelta, friable, ligeramente plástico y ligeramente adhesivos en superficie y firmes, plásticos y adhesivos en profundidad (IREN- UACH, 1978).

Los valores de densidad aparente y real más frecuentes son de 0.61 y 2.25 g cm⁻³ respectivamente, siendo su porosidad total de un 73%. La capacidad de campo y punto de marchitez permanente son de 53.5 y 34.2% en base seca, respectivamente y presentan una velocidad de infiltración moderada (IREN- UACH, 1978).

CUADRO 1. Resumen de las características químicas y físicas de la serie Osorno

FUENTE: IREN-UACH (1978)

Profundidad	0-16	16-31	31-60	60-87	87y+
Densidad aparente (gr/cm ³)	0.61				
Densidad real (gr/cm ³)	2.25				
Velocidad de infiltración (cm/hora)	3.0				
pH 1:2,5 (agua)	5.3	5.9	6.5	6.6	6.5
% de C (Wakley y Black)	13.98	8.83	6	4.7	3.56
% de M.O. (%)	24.1	15.2	10.4	8	6.1
CIC meq/100	58.36	62.38	50.05	43.1	51.29
K int meq/100	0.47	0.3	0.16	0.3	0.16
Na int meq/100	0.44	0.24	0.29	0.36	0.4
Ca int meq/100	8.09	6.29	5.35	4.08	4.26
Mg int meq/100	1.64	1.74	1.81	2.58	2.28
% saturación de bases	18.2	13.7	15.2	17	13.8
P.aprov.(hidroxiquinolina)ppm	9.1	8.8	5.6	5.4	3.9
% N total	0.88	0.58	0.38	0.24	0.16
Relación C/N	15.9:1	15.2:1	15.8:1	19.6:1	23.3:1
Al extractable ppm	667	681.8	678.6	708.5	663.7
Fe extractable ppm	19.6	22.1	10.6	21.4	19.5
Capacidad de fijación de P%	63.4	66.5	69.4	74.9	72.8
C de C% bsh	53.5	73.9	61.6	57.4	56.5
P de M P % bsh	34.2	57.1	38.6	40.8	43.1

2.3 Aluminio en el suelo.

El aluminio, es uno de los elementos más abundantes del suelo, comprendiendo el 7.1% del peso total de la corteza terrestre. Durante la meteorización, el aluminio es liberado desde minerales primarios y es precipitado como un mineral secundario, principalmente como aluminosilicato (LINDSAY, 1979).

El aluminio se encuentra en diversas formas estructurales del suelo (principalmente como octaedro de Al) y en la mayoría de los diversos compuestos minerales presentes en el suelo. Al ser tan abundante se encuentra en las distintas fases funcionales del suelo. Existe aluminio, tanto en solución, como adsorbido, en los minerales primarios y como compuestos secundarios precipitados. La presencia de Al en la solución, es dominada por el pH del suelo (la que permite la disolución de precipitados lábiles) y por el mecanismo de adsorción del suelo, a través del intercambio entre el Al adsorbido y el Al en solución del suelo, los cuales son dependientes del tipo y cantidad de arcilla presente (Pinochet, 2000 citado por RADIC, 2000).

El aluminio es un constituyente del alofán y de los tipos de arcillas dominantes en los suelos volcánicos. Este es liberado desde los materiales piroclásticos e incorporado principalmente dentro del alofán, igmogolita y complejos de humus en Andisols jóvenes. El aluminio es uno de los mayores elementos presente en la tefras, el contenido de Aluminio en materiales no cristalinos es usado para estimar la tasa química de meteorización en Andisols cuando su edad es conocida. Además, el humus contenido en los Andisols muestra una cerrada relación lineal con el aluminio, el cual forma complejos humus Al (SHOJI *et al.*, 1993).

La acumulación de formas activas de aluminio y hierro, que forman los complejos de humus-Al en horizontes de los andisols, es una de las propiedades más importantes que está implicada en el concepto central de Andisol. El aluminio y el hierro no sólo determinan o influyen fuertemente en las propiedades químicas y físicas

de los Andisols, sino que también influyen en la productividad del suelo (SHOJI *et al.*, 1993).

2.3.1 Aluminio extractable. Se define como aluminio extractable aquel que se remueve parcialmente de los grupos de aluminio estructural de las arcillas y de los óxidos responsables de la adsorción de fósforo (Rodríguez, 1993 citado por BONOMELLI, *et al.*, 2003). Los métodos de extracción son variados y usualmente corresponden al Al que es extraído a través de una disolución suave del suelo con una sal. Se ha determinado que el aluminio extractable en acetato de amonio pH 4.8 1M es un buen indicador de la retención o fijación de fósforo en el suelo, probablemente debido a que se relaciona con la mineralogía de las arcillas (BONOMELLI *et al.*, 2003).

En un estudio realizado por ALAMOS *et al.*, (1967), se determinó, que a mayor aluminio extractable en acetato de amonio 1M, a pH 4.8 en los suelos, mayor es la sorción del ion fosfato. Además, que a mayor predominancia de arcillas amorfas en el suelo, existe una mayor cantidad de aluminio extractable. Estudios realizados por URBINA *et al.* (1965), mostraron que un aumento del aluminio extractable correlacionó con un mayor contenido de materia orgánica de los suelos, probablemente, debido a que los suelos con altos contenidos de materiales amorfos presentan una mayor complejidad órgano-mineral en sus coloides, dados por las asociaciones humus-aluminio. En otros estudios, se demostró que existe una fuerte relación entre el contenido de aluminio extractable y la fijación de fósforo, encontrándose, que en los horizontes superficiales de los suelos estudiados, la mayor fijación de fósforo estaba relacionada con un alto contenido de materia orgánica y de aluminio, siendo los componentes de mayor participación en el proceso de fijación de fósforo, los compuestos de hierro y aluminio (óxidos e hidróxidos) y los minerales de arcillas (ALAMOS *et al.*, 1967).

El aluminio extractable es importante para la clasificación de suelos, evaluación de suelos y determinación de la disponibilidad de nutrientes (United States Department Agriculture, 2003, citado por VERA, 2004).

2.3.2 Determinación de aluminio extractable en acetato de amonio pH 4.8. Según SADZAWKA *et al.* (2000), en los métodos de análisis para suelos chilenos la extracción de aluminio extractable se debe realizar con acetato de amonio 1M a pH 4.8 y posterior determinación a través de espectrofotometría de absorción atómica con llama de óxido nitroso-acetileno.

En un estudio realizado en distintos suelos de Estado Unidos (Mc LEAN *et al.* 1959), se compararon la extracción de aluminio extractable: en acetato de amonio ajustados a distintos valores de pH con ácido acético concentrado y con adición de solución de BaCl₂ 0,2 N, acetato de Ba y solución de BaCl₂ 1N preparada a distintos valores de pH. El resultado mostró que la extracción con acetato de amonio a pH 4.8 fue un buen extractante de Al y superior a los otros métodos evaluados. La extracción con acetato de amonio a pH 4.8 logra extraer aluminio desde la mayoría de los suelos (Mc LEAN *et al.*, 1958). La solución de acetato de amonio, al estar tamponada, se mantiene esencialmente a pH 4.8, independiente del pH del suelo. Los otros extractantes utilizados (particularmente las sales de bario) presentaron cambios en pH del suelo y esto hace que el aluminio extractable disminuya y/o varíe (Mc LEAN *et al.*, 1959).

2.4 Variabilidad y dependencia espacial.

El suelo es considerado un manto continuo, sin embargo, las propiedades de éste, a sí como la mayoría de las propiedades espacialmente distribuidas de la superficie terrestre, presentan distintos grados de variabilidad (Webster, 1977, citado por MARDONES, 2003).

La variabilidad es el producto de la acción de factores formadores del suelo y sus interacciones en un continuo espacio- temporal. Los efectos de aquellos factores que actúan a una gran escala o durante un periodo largo, serán modificados por otros procesos que actúan a una escala más local o con una mayor frecuencia. Dada la naturaleza de la variación del suelo, el tipo y las causas de la heterogeneidad que se

pueden identificar en los estudios de variabilidad dependen en gran medida de la escala y la frecuencia de las observaciones (ULLOA *et al.*, 2003).

La variabilidad de las propiedades del suelo, de un punto a otro del paisaje, tiene orígenes diversos, pudiendo provenir de las características inherentes a los procesos de formación de suelo predominante, o bien de los factores de formación. Es decir, la histología, el clima, la topografía, la actividad biológica y la acción humana. Algunos de los procesos y factores de formación que inducen la variabilidad espacial, afectan a pequeños volúmenes de suelo e introducen la heterogeneidad a distancias cortas, otros provocan dependencia espacial de más largo alcance (ULLOA *et al.*, 2003).

La variabilidad depende de las propiedades a analizar, siendo más variables las propiedades químicas del suelo. Además, existe una menor variación en las propiedades del suelo en condición natural que cuando este ha sido sometido a laboreos, aquellas propiedades que más se afectan por el manejo del suelo, serán las que presenten una mayor variabilidad (JARAMAL, 2002; OVALLE, 1991).

La variabilidad espacial en el estudio de la heterogeneidad del suelo, se extiende desde una escala global a cambios en la composición estructural y química de la composición mineral del suelo, a una microescala. La naturaleza de la variabilidad del suelo identificada por los estudios de las propiedades del suelo depende, de la escala de observación, de las propiedades que están siendo identificadas y de la metodología usada para conducir la investigación (Wilding y Drees, 1983; Sawhney, 1977, citado por TRANGMAR *et al.*, 1985).

Cuando una variable, en un sitio depende de la distancia y/o la dirección, se tiene una variable con dependencia espacial (JARAMAL, 2002).

Desde el punto de vista agronómico, la variabilidad del suelo, está determinada por la variabilidad producida por el uso de cultivos. Más recientemente, la correlación

existente entre la variabilidad inducida por el manejo puede ser utilizada en la optimización de la aplicación de los fertilizantes y agroquímicos. Esta práctica agronómica ha sido introducida como agricultura de precisión (OVALLE y REY, 1995).

2.4.1 Variabilidad sistemática. La variabilidad sistemática corresponde a los cambios graduales en una variable producto de un patrón regular y que puede ser determinado geoestadísticamente. Se expresa como un cambio gradual de las propiedades del suelo, que puede ser entendida en términos de los factores o procesos de formación del suelo en una escala de observación determinada. Es decir, la variabilidad del suelo es el producto de la formación del suelo, operando e interactuando sobre un continuo de escalas espaciales y temporales. Los procesos que actúan sobre distancias largas (vale decir, el clima) o por períodos largos de tiempo (es decir, la meteorización del suelo) son modificados y afectados sistemáticamente por otros procesos que operan más localmente (es decir, la erosión y redepositación de materiales parentales) o por procesos más frecuentes (es decir, el tiempo) (TRANGMAR *et al.*, 1985).

Fuentes de variación sistemática, pueden ser ordenadas desde diferencias en topografía, litología, clima, actividad biológica y edad del suelo en estudios regionales, a diferencias observadas a un nivel micro, como la composición físico-química del suelo (TRANGMAR *et al.*, 1985). Además se puede incluir el manejo del suelo, desmonte, cultivos y nivelación del suelo, lo que descarta que la variación sistemática sea un fenómeno exclusivamente intrínseco del suelo (O'Halloran *et al.*, 1985; Mueller-Harvey *et al.*, 1985, citado por SAINATO *et al.*, 1996). Franze y Berglund, (1997), citados por MARDONES (2003), señalan que el manejo sería la principal fuente de variabilidad en una escala menor en el suelo, aparte del efecto de algunos procesos pedogenéticos como la microtopografía

2.4.2 Variabilidad aleatoria. Asociada a la variabilidad sistemática, están las diferencias observadas en las propiedades del suelo que no pueden ser relacionadas a una causa conocida. Existen a menudo, fuentes de variación espacial, temporal y de

medición, que no se pueden discernir por la naturaleza o escala de investigación. Esta inexplicable heterogeneidad, es llamada variación aleatoria, azar o ruido. Sin embargo la heterogeneidad que ha sido previamente definida como variación aleatoria, puede contener un componente sistemático (TRANGMAR *et al.*, 1985).

2.5 Estadística descriptiva.

Si un grupo de datos, cumple con el supuesto de normalidad, aleatoriedad o independencia de las observaciones, la variabilidad de ellos puede ser estudiada con estimadores paramétricos, como son la amplitud del rango, la varianza o el coeficiente de variación (JARAMAL, 2002).

El método estadístico tradicional, se agrupa dentro de tres categorías: medición de localización, medición de extensión y medición de forma (ISAAKS y SRIVASTAVA, 1989). Los estadísticos del primer grupo, dan alguna idea de donde esta el centro de la distribución. El segundo grupo, donde se incluye la varianza y la desviación estándar, son usados para describir la variabilidad de los datos. La forma de la distribución es descrita por el coeficiente de simetría (skewness) y el coeficiente de variación, el primero provee la información de la simetría, mientras que el segundo provee la información de la longitud de la cola para ciertas distribuciones (ISAAKS y SRIVASTAVA, 1989).

Este modelo clásico, es inadecuado para la interpolación de variables dependientes espacialmente, por que asume, una variación aleatoria y no toma en cuenta la correlación espacial y la relativa localización de las muestras (TRAGMAR *et al.*, 1985).

2.5.1 Media. La media, m , es el promedio aritmético de los valores de datos (ISAAKS y SRIVASTAVA, 1989). Si se tiene un set de N observaciones, z_i , $i = 1, 2, \dots, N$, entonces podemos calcular su promedio aritmético y puede ser denotado como \bar{z} , como se muestra en la ecuación 2.1 (WEBSTER y OLIVER, 2001).

$$\bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \quad (2.1)$$

La media y la mediana, han sido usadas como mediciones de la tendencia central para la población, pero para aquellas poblaciones en que la distribución no es simétrica la media y la mediana presentan valores distintos (WEBSTER y OLIVER, 2001).

2.5.2 Varianza y desviación estándar. La varianza de un set de datos de valores, es por definición, como se muestra en la ecuación 2.2.

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2 \quad (2.2)$$

La desviación estándar, es simplemente la raíz cuadrada de la varianza, la cual representa el grado de dispersión de la población respecto a la media. La desviación estándar, expresa la dispersión en la misma unidad en la cual la variable esta siendo medida (WEBSTER y OLIVER, 2001; ISAACS y SRIVASTAVA, 1989).

2.5.3 Coeficiente de variación. Existen situaciones en que la variabilidad es necesaria expresarla en termino relativos, como cuando una propiedad ha sido medida en dos diferentes regiones tomando similares valores de desviación estándar, pero el promedio es diferente, en este caso se utiliza el coeficiente de variación (CV), el cual es usualmente representado como un porcentaje y puede ser expresado como la relación de la desviación estándar con la media (WEBSTER y OLIVER, 2001).

$$CV = (s / \bar{z}) \times 100 \quad (2.3)$$

El coeficiente de variación, describe la forma de la distribución y puede indicar la presencia de algunos valores altos erráticos, que pueden llegar a tener un significativo impacto en la estimación final (ISAAKS y SRIVASTAVA, 1989).

2.5.4 Distribución normal. La distribución normal, es central para la teoría estadística, muchas variables medioambientales, tales como las del suelo, son distribuidas en una vía que se aproxima a la distribución normal. Esta distribución, está definida por una variable continua y aleatoria Z , en términos de una función de densidad probabilística y que se define como:

$$f(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2.4)$$

donde, la μ es la media de la distribución y σ es la varianza (WEBSTER y OLIVER, 2001). La figura de la distribución normal, es una sección representativa vertical a través de una campana. Esta es continua y simétrica, con el centro en la media de la distribución (WEBSTER y OLIVER, 2001).

En ocasiones, se debe recurrir a transformaciones para poder lograr una distribución normal, de esta forma se logra que la varianza de la muestra se haga menos dependiente de la media y más estable (Van Meirvenne, 1997, citado por MATTE, 2000).

2.5.4.1 Coeficiente de simetría o skewness. Un estadístico más comúnmente usado para resumir la simetría es el coeficiente de simetría o skewness, el cual es definido como:

$$CS = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^3}{\sigma^3} \quad (2.5)$$

donde, el numerador es el promedio al cubo de la diferencia entre los valores de los datos y su media, y el denominador es el cubo de la desviación estándar (ISAAKS, SRIVASTAVA, 1989).

El coeficiente de skewness, mide la simetría de la observación y en una distribución simétrica, tiene un coeficiente igual a cero, el histograma es aproximadamente simétrico y la mediana se acerca a la media (WEBSTER y OLIVER, 2001; ISAAKS y SRIVASTAVA, 1989). Un coeficiente positivo, tiene un histograma con una larga cola de valores altos a la derecha, haciendo la mediana menos que la media. Si existe, una larga cola de pequeños valores a la izquierda la mediana es mayor que la media, el histograma será negativamente sesgado (ISAAKS y SRIVASTAVA, 1989).

2.5.4.2 Coeficiente de kurtosis. La kurtosis, expresa el grado de esbeltez de una distribución (WEBSTER y OLIVER, 2001). El coeficiente de kurtosis es definido por:

$$kurtosis = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^3}{(N-1)S^4} - 3 \quad (2.6)$$

donde, Y es la media, S la desviación estándar, y N es el número de datos (ENGINEERING STATISTICS HANDBOOK, 2004).

El significado de la kurtosis, está mayormente relacionada a la distribución normal, para lo cual su coeficiente es igual a cero, si la distribución es más puntuda que la normal, este toma valores mayores a cero y si es más achatada, toma valores menores que cero (WEBSTER y OLIVER, 2001).

2.6 Análisis geoestadístico.

La clasificación y estudio del suelo ha sido tradicionalmente el acercamiento más práctico para agrupar y separar diferentes suelos a una escala regional, pero en cambio, la variabilidad de las propiedades en sitios pequeños es bastante desconocida y a menudo es descrita por medio de parámetros estadísticos clásicos (TRANGMAR *et al.*, 1985). La estadística clásica, asume que el promedio de la unidad muestreada es el valor esperado para todos los puntos en la unidad y la varianza es un estimador del error dentro de la unidad. Esta aproximación, asume que la variabilidad sobre la media es aleatoria y no contiene referencias a la distribución geográfica de las diferencias dentro de la unidad muestreada. Diversos estudios, han mostrado que este aspecto aleatorio de la variabilidad del suelo, contiene un componente que es espacialmente dependiente (McBratney *et al.*, 1982; Yost *et al.*, 1982; Gajem *et al.*, 1981; Vieira *et al.*, 1981; Burgess y Webster, 1980; Cambell, 1978, citado por TRAGMAR *et al.*, 1985), esto implica, que dentro de un distancia o rango de dependencia espacial, las diferencias en las propiedades del suelo pueden ser descritas como una función de su separación espacial. Los métodos tradicionales de clasificación y análisis estadísticos no consideran directamente este aspecto (TRAGMAR *et al.*, 1985).

La geoestadística, surge como la necesidad de aplicar las ideas estadísticas a problemas que involucran el conocimiento de distribuciones espaciales dentro de la ciencia del suelo (Folorunso *et al.*, 1994, citado por MARDONES, 2003).

2.6.1 Geoestadística. La geoestadística, se define como la aplicación de la teoría aleatoria al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales o simplemente, como el estudio de las variables numéricas distribuidas en el espacio (Chauvet, 1994; Journel y Huijbregts, 1978, citado por CUADOR, 2003).

El análisis geoestadístico, se refiere al análisis de los fenómenos naturales y a una serie de técnicas estadísticas que permiten analizar variables regionalizadas. Una variable regionalizada, no es más que una función que describe un fenómeno natural

geográficamente distribuido (OVALLE, 1991). Los principios de la geoestadística toman en cuenta la dependencia espacial que existe entre observaciones separadas por una determinada distancia, mientras más cercana estén las observaciones, ella serán más similares. El grado de similitud disminuye con la distancia (OVALLE, 1991).

Según Matheron (1963), citado por YOST *et al.* (1982a), la geoestadística, al incorporar el componente espacial (distancia) se diferencia de los enfoques estadísticos clásicos. Esto se debe, a que el enfoque clásico no dispone de un adecuado tratamiento de los aspectos de los datos espaciales y los puntos de muestreos tomados más cercanos tienden a presentar una similitud mayor que los que están más distantes. Además, se puede cuantificar relaciones espaciales entre los valores de las propiedades y usarlas para realizar interpolaciones (Tragmar, 1985 citado por SAINATO *et al.*, 1996).

Los métodos geoestadísticos, han sido la herramienta más utilizada por los científicos del suelo en las dos últimas décadas, ya que permite estudiar la variabilidad y la estructura de la variación de las propiedades físicas, químicas y morfológicas del suelo (BURGOS *et al.*, 2003).

2.6.2 Variable regionalizada y funciones aleatorias. Una variable regionalizada, es una función que describe un fenómeno natural que se encuentra distribuido geográficamente (Davis, 1986; Olea, 1977 citado por OVALLE y NUÑEZ, 1994), y corresponde a una variable que se encuentra en el espacio que muestra una cierta estructura (Gurovich y Stern, 1983; Utset *et al.*, 1989, citado por OVALLE y NUÑEZ, 1994).

La teoría de la variable regionalizada, toma en cuenta la estructura y característica aleatoria de las variables distribuidas espacialmente, para proveer de herramientas cuantitativas para su descripción y óptima estimación imparcial (TRANGMAR *et al.*, 1985). Una variable aleatoria, es la medida de individuos que se espera que varíen de acuerdo a alguna regla de distribución. Está caracterizada por los

parámetros de distribución, tales como la media y la varianza de distribución normal (TRANGMAR *et al.*, 1985).

Una variable regionalizada $Z(x)$ es una variable aleatoria, que puede tomar diferentes valores Z en una localización x dentro de alguna región (Journel y Huibregts, 1978, citado por TRANGMAR *et al.*, 1985). Es decir, una variable regionalizada puede ser considerada como una realización particular de una variable aleatoria, para una fijada localización dentro de una región. Si todos los valores son considerados en todas las localizaciones dentro de la región, entonces la variable regionalizada se convierte en un componente de sistema infinito de variables aleatorias para toda la localización dentro de la región. Tales componentes son llamados función aleatoria, porque son asociadas a la variable aleatoria dentro de cualquier localización (Huibregts, 1975, citado por TRANGMAR *et al.*, 1985).

2.6.2.1 Estacionaridad. Una función aleatoria $Z(X)$, es llamada a ser estacionaria de primer orden, si sus valores esperados son los mismos en toda la localización a través de la región en estudio:

$$E[Z(x)] = m \quad (2.7)$$

donde, m es la media en la estadística clásica y:

$$E[Z(x) - Z(x+h)] = 0 \quad (2.8)$$

donde, h es el vector de separación entre la localización de las muestras. (TRANGMAR *et al.*, 1985).

La estacionaria de segundo orden es aplicada a la covarianza espacial $C(h)$ para cada $Z(x)$ y $Z(z+h)$ de pares de muestras (independientes de la posición) a través de toda la región en estudio y es dependiente de la distancia de separación:

$$C(h) = E[Z(x) - m][Z(x+h) - m] \quad (2.9)$$

Si h se hace más grande, $C(h)$ disminuye y la covarianza espacial decae. La estacionaridad de $C(h)$ implica estacionaridad en la varianza muestral s^2 . La covarianza espacial se aproxima a la varianza muestral cuando la distancia de separación tiende a cero (TRANGMAR *et al.*, 1985). La estacionaridad de segundo orden, no puede ser definida si la varianza y la covarianza no son finitas, este es el caso de fenómenos de tendencia y una forma estacionaria más débil, llamada hipótesis intrínseca, llega a ser asumida. Esta hipótesis, requiere que para todos los vectores de h , la varianza del incremento $Z(x) - Z(x+h)$ sea finita e independiente de la posición dentro de la región en estudio.

$$\begin{aligned} \text{VAR}[Z(x) - Z(x+h)] &= E[Z(x) - Z(x+h)]^2 \\ &= 2\gamma(h) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Dividiendo por dos se obtiene la semivarianza (TRANGMAR *et al.*, 1985).

Según Hamlett *et al.*, (1986) citado por MARDONES (2003), señalan que la utilización de técnicas de análisis exploratorios de datos, puede ser una manera de cumplir con los principios de estacionaridad. Esta herramienta, puede ser importante para ayudar a modelar la estructura espacial de los datos y robustecer las medidas utilizando herramientas gráficas, logrando así identificar con mayor facilidad los puntos fuera de lugar y las tendencias direccionales.

2.6.3 Análisis de dependencia espacial. El concepto de variable regionalizada y estacionaria, nos provee la teoría básica para el análisis de la dependencia espacial usando autocorrelación o semivariograma (TRANGMAR *et al.*, 1985).

2.6.3.1 La semivarianza. La teoría de la variable regionalizada, asume que la semivarianza, entre dos puntos cualesquiera dentro de la región en estudio, solo dependerá de la distancia y dirección de separación entre ellos y no de su localización geográfica (TRANGMAR *et al.*, 1985).

La semivarianza $\gamma(h)$, describe el componente dependiente espacial de la función aleatoria Z . Esto es igual a la mitad del cuadrado esperado entre la distancia de dos muestras separados por una determinada distancia h .

$$\gamma(h) = E[Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (2.11)$$

La semivarianza en una determinada distancia h , es estimada como el promedio de los cuadrados diferentes entre todas las observaciones separadas por una distancia, donde hay $N(h)$ pares de observaciones.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (2.12)$$

El valor de $\gamma(0)$ es llamado varianza nugget y representa una medida del error o microvariabilidad de las propiedades que no han sido incluidas en la escala de muestreo. Las variables serán consideradas independientes y aleatorias (efecto nugget puro) cuando el umbral (varianza total) sea igual a la varianza nugget (SAINATO *et al.*, 1996).

2.6.3.2 Covarianza y autocorrelación. La covarianza, determina la relación que existe entre dos variables de pares de observaciones y como se distribuyen espacialmente estas. Describe la dependencia que existe entre valores de $Z(x)$ con el cambio de distancia (TRANGMAR *et al.*, 1985). La covarianza, es afectada por la escala en la cual las propiedades son medidas. Esto hace, que la comparación entre diferentes pares de

variables y un conjunto de observaciones, sea difícil, al menos que las mediciones sean en la misma escala (TRANGMAR *et al.*, 1985).

La función de autocorrelación, expresa la correlación lineal entre una serie espacial y la misma serie a un intervalo de distancia más lejana. La definición asume, la estacionaridad de segundo orden, en el cual la autocorrelación es expresada como:

$$r(h) = C(h) / s^2 \quad (2.13)$$

donde, $r(h)$ es la autocorrelación entre muestras en una distancia de separación, o retraso h (TRANGMAR *et al.*, 1985).

Los valores de la función de autocorrelación, son normalizados en el rango desde -1 a 1, inclusive. El valor máximo de autocorrelación es 1 a una distancia cero ($h = 0$) y los valores disminuyen con el incremento de la distancia h . La distancia en la cual $r(h)$ no tiene mayor disminución define el rango bajo el cual, las muestras de la variable son dependientes espacialmente (TRANGMAR *et al.*, 1985).

El gráfico de los valores de autocorrelación $r(h)$ versus el retraso h es llamado correlograma y se muestra en la Figura 1 (TRANGMAR *et al.*, 1985).

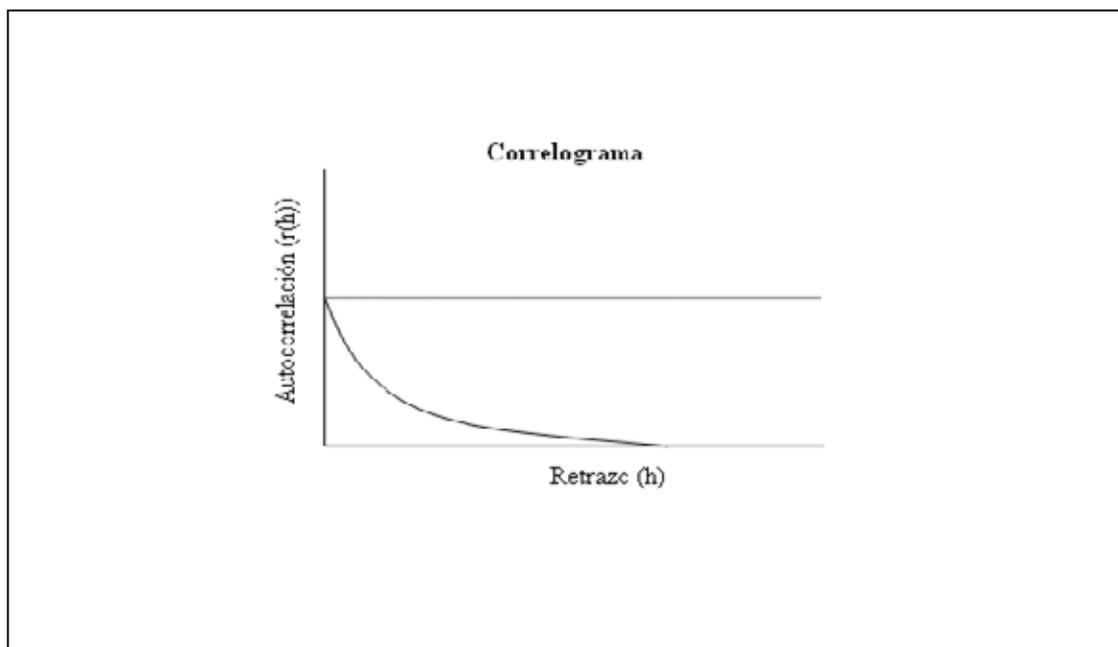


FIGURA 1. Autocorrelograma, relación entre la distancia de separación (retrazo) y la autocorrelación.

FUENTE: Adaptado de OLIVER Y WEBSTER (2001).

El correlograma, tiene que ser usado como una medida de expresión del cambio entre las mediciones de campo de las propiedades del suelo que se encuentran a cierta distancia y el grado de dependencia entre observaciones cercanas (VIERA *et al.*, 1981).

2.6.3.3 Semivariograma. El semivariograma es de acuerdo al modelo ajustado, la función que caracteriza la variabilidad espacial de la variable en estudio. Caracteriza el incremento de una función aleatoria Z , entre dos localizaciones separadas, por una distancia h y es definido bajo la hipótesis estacionaria de primer orden (APEZTEGUIA, *et al.*, 1999; TRANGMAR *et al.*, 1985).

Según Sánchez (1998), citado por MARDONES (2003), el semivariograma es un índice de la variabilidad en el terreno y representa una curva construida en un plano de ejes cartesiano. El semivariograma para una determinada dirección, es usualmente

visualizado como un grafico entre la semivarianzas y la distancia h , como se muestra en la Figura 2 (TRANGMAR *et al.*, 1985).

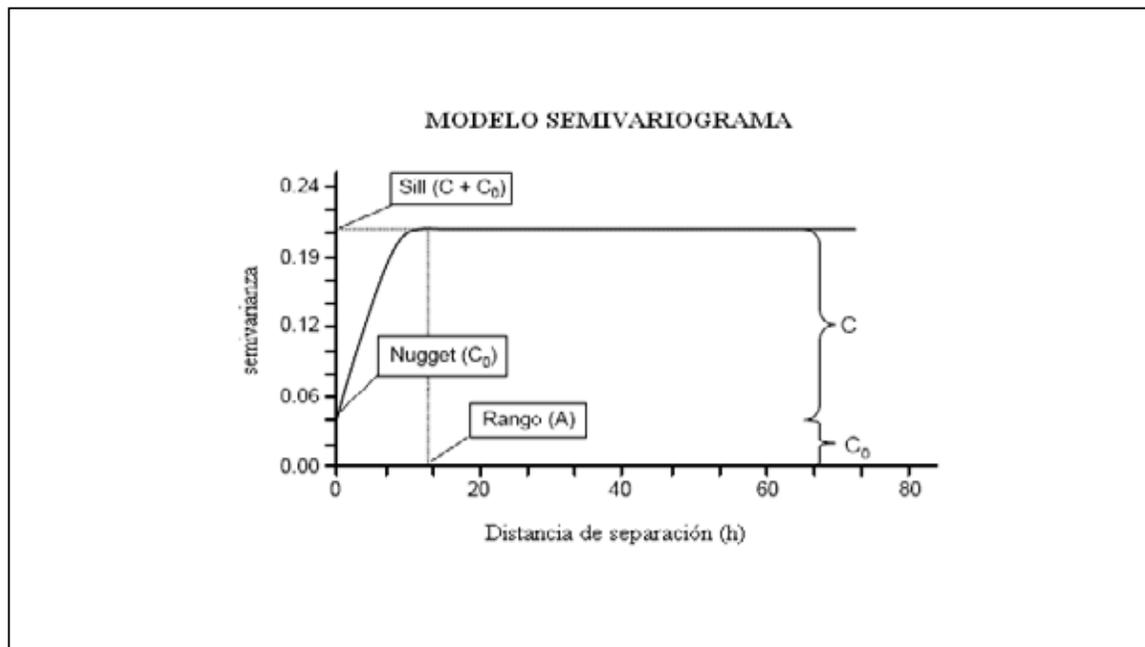


FIGURA 2. Modelo semivariograma, relación entre la distancia de separación de las muestras y la semivarianza.

FUENTE: Adaptado de GAMMA DESING SOFTWARE (2004).

JARAMAL (2002), señala, que la escala de trabajo puede variar el semivariograma, pudiendo cambiar las propiedades de éste, presentando una mayor distribución en los datos y una mayor ciclicidad en los semivariogramas, a medida que la distancia entre las muestras aumenta.

Para la construcción de un semivariograma confiable, se debiera estimar a lo menos 30 pares de muestras (Journel y Huigbregts, 1978 citado por HENRIQUEZ y VILORIA, 1999). Sin embargo Webster y Oliver (1992), citado por HENRIQUEZ y VILORIA (1999), señalan que la precisión de la estimación del semivariograma está condicionada por el número total de observaciones de que se compone la muestra y que

50 observaciones, sería un número muy pequeño de muestras y serían necesarias al menos 100 muestras, pero que 150 muestras podrían ser satisfactorias para una variable isotrópicamente distribuida.

2.6.3.3.1 Rango de dependencia espacial. Como la distancia entre muestras aumenta, en el variograma, los valores correspondientes también generalmente aumentan. Sin embargo, un incremento en la separación de la distancia, no causa un aumento correspondiente en la diferencia cuadrada del promedio entre pares de valores y el variograma alcanza un techo. La distancia en la cual el variograma alcanza el techo, es llamado el rango de dependencia espacial (A) (ISAAKS y SRIVASTAVA, 1989).

El rango de dependencia espacial, al ser expresado como una distancia, puede ser interpretado como el diámetro de la zona de influencia, la cual representa la máxima distancia promedio, sobre la cual dos muestras de una propiedad del suelo están relacionadas. En una distancia menor que el rango, las propiedades medidas de dos muestras, llegan a ser más similares con la disminución de la distancia entre ellas. El rango, provee un estimador del área de semejanza (YOST, *et al.*, 1982).

2.6.3.3.2 Umbral. El techo o umbral en el que el semivariograma alcanza el rango es llamado meseta o sill (ISAAKS y SRIVASTAVA, 1989).

2.6.3.3.3 Efecto nugget o varianza nugget. Aunque los valores del variograma para $h = 0$ debiera ser estrictamente 0, diferentes factores, como el error en el muestreo o la microvariabilidad en las propiedades del suelo que no puede ser determinada en la escala de muestreo, pueden causar que valores de muestras separadas por distancias extremadamente pequeñas, sean bastantes distintas. Esto representa, una varianza inexplicada (aleatoria) y causa una discontinuidad en el origen del variograma. El salto vertical desde el valor cero al origen del variograma es llamado el efecto nugget (ISAAKS y SRIVASTAVA, 1989; TRANGMAR *et al.*, 1985).

El semivariograma, exhibe un efecto nugget puro (100% de sill) cuando $Y(h)$ es igual al umbral en todos los valores de h . El efecto nugget puro, se presenta desde puntos muy grandes a puntos de variación en una distancia corta e indica una total ausencia de correlación espacial en la escala de muestreo usada (Figura 3) (TRANGMAR et al, 1985).

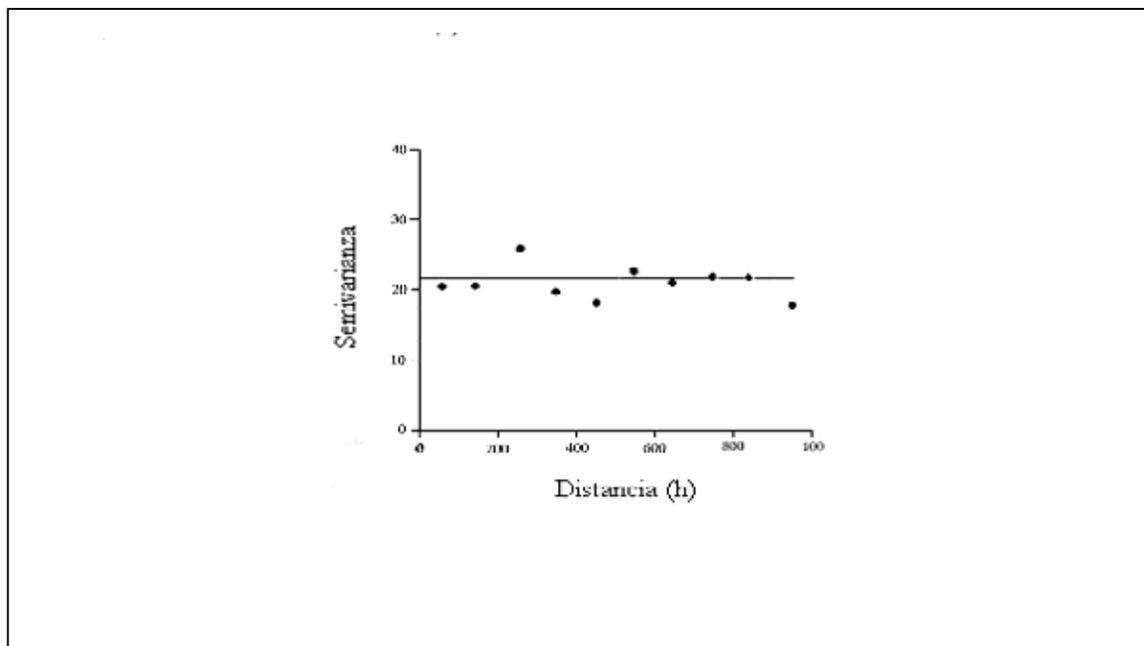


FIGURA 3. Efecto nugget, ausencia total de dependencia espacial entre las muestras.

FUENTE: Adaptado de OVALLE y REY (1995).

Cambardella *et al.* (1994), citado por SAINATO *et al.* (1996), señalan, que al expresar la semivarianza de nugget (C_0) como un porcentaje del valor del umbral (C) se puede hacer una comparación del tamaño relativo del efecto nugget en las propiedades del suelo. De esta forma, se obtienen distintas clases de dependencia espacial de las variables del suelo: si la razón es de 25%, la variable se considera fuertemente dependiente; si este coeficiente está entre 25% y 75% la variable es moderadamente dependiente y si la razón es mayor que 75%, se considera débilmente dependiente.

2.6.4 Tipos de semivariogramas. El semivariograma puede tomar muchas formas, dependiendo de los datos y del intervalo usado en el muestreo (TRANGMAR *et al.*, 1985).

El modelo del variograma puede ser dividido en dos tipos, los que alcanzan un umbral y los que no. Los modelos de variogramas del primer tipo, son a menudo referidos como un modelo de transición. Algunos modelos de transición alcanzan su umbral asintóticamente. Para cada modelo, el rango es arbitrario y es definido como la distancia en la cual el 95% del umbral es alcanzado (ISAAKS y SRIVASTAVA, 1989).

Los modelos del segundo tipo no alcanzan un umbral. Pero continúan creciendo a medida que la magnitud de h aumenta. Estos modelos son necesarios cuando hay una tendencia en los valores de los datos (ISAAKS y SRIVASTAVA, 1989). Según JARAMAL (2002), en estudios de suelos, los modelos de semivariograma más frecuentemente usados son los lineales con sill, esférico, exponencial y gaussiano en los transicionales y el lineal en los no transicionales.

2.6.4.1 Modelo esférico. El modelo esférico es una función cuadrática, en la cual en alguna distancia A_o los pares de puntos ya no son correlacionados y el semivariograma alcanza una asíntota. La fórmula usada para este modelo es:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_o + C \left[1.5(h/a)^3 \right] & \text{Si } h \leq a & \quad (2.14) \\ \gamma(h) &= C_o + C & \text{Si } h > a & \end{aligned}$$

donde, γ es la semivarianza, h es la distancia de retraso, C_o es el efecto nugget, C es la varianza estructural y A_o es el rango de dependencia espacial (GAMMA DESING SOFTWARE, 2004).

Para el caso del semivariograma anisotrópico, el rango de dependencia espacial asume dos distancias A_1 en el eje mayor y A_2 en el eje menor. Esto es igual para todos los modelos (GAMMA DESING SOFTWARE, 2004).

2.6.4.2 Modelo exponencial. El modelo exponencial es similar al esférico, en el cual éste se aproxima gradualmente al umbral. Pero, lo que lo diferencia del esférico, es la tasa a la cual se aproxima y que la curva del modelo y el umbral nunca llegan a converger. La formula de este modelo es:

$$\gamma(h) = C_o + C[1 - \exp(-h / A_o)] \quad (2.15)$$

En el caso del modelo exponencial, A no es el rango, sino que un parámetro que define el rango. En este caso, se asume que esta dado por la distancia a la cual se alcanza el 95% del umbral y el rango efectivo corresponde a $A = 3A_o$ (GAMMA DESING SOFTWARE, 2004; ISAACS y SRIVASTAVA, 1989).

2.6.4.3 Modelo gaussiano. El modelo gaussiano, es similar al modelo exponencial pero asume una aproximación gradual para el intercepto en Y . La fórmula que define este modelo es:

$$\gamma(h) = C_o + C[1 - \exp(-h^2 / A_o^2)] \quad (2.16)$$

Al igual que el modelo exponencial, A es un parámetro y el rango efectivo esta definido por $A = 3^{0.5} A_o$, el cual es la distancia, donde el umbral ($C_o + C$) esta dentro del 5% de la asíntota (en el modelo gaussiano y en el exponencial, el umbral nunca se reúne con la asíntota) (GAMMA DESING SOFTWARE, 2004).

2.6.4.4 Modelo lineal. El modelo lineal describe un variograma de línea recta. En este modelo, el umbral no existe y el rango es definido arbitrariamente como la distancia a la

cual el modelo cruza la varianza (GAMMA DESING SOFTWARE, 2004; TRAGMAR *et al.*, 1985). La formula de este modelo es:

$$\gamma(h) = C_o + [h(C + A_o)] \quad (2.17)$$

En la Figura 4 se muestran todos los modelos anteriormente mencionados.

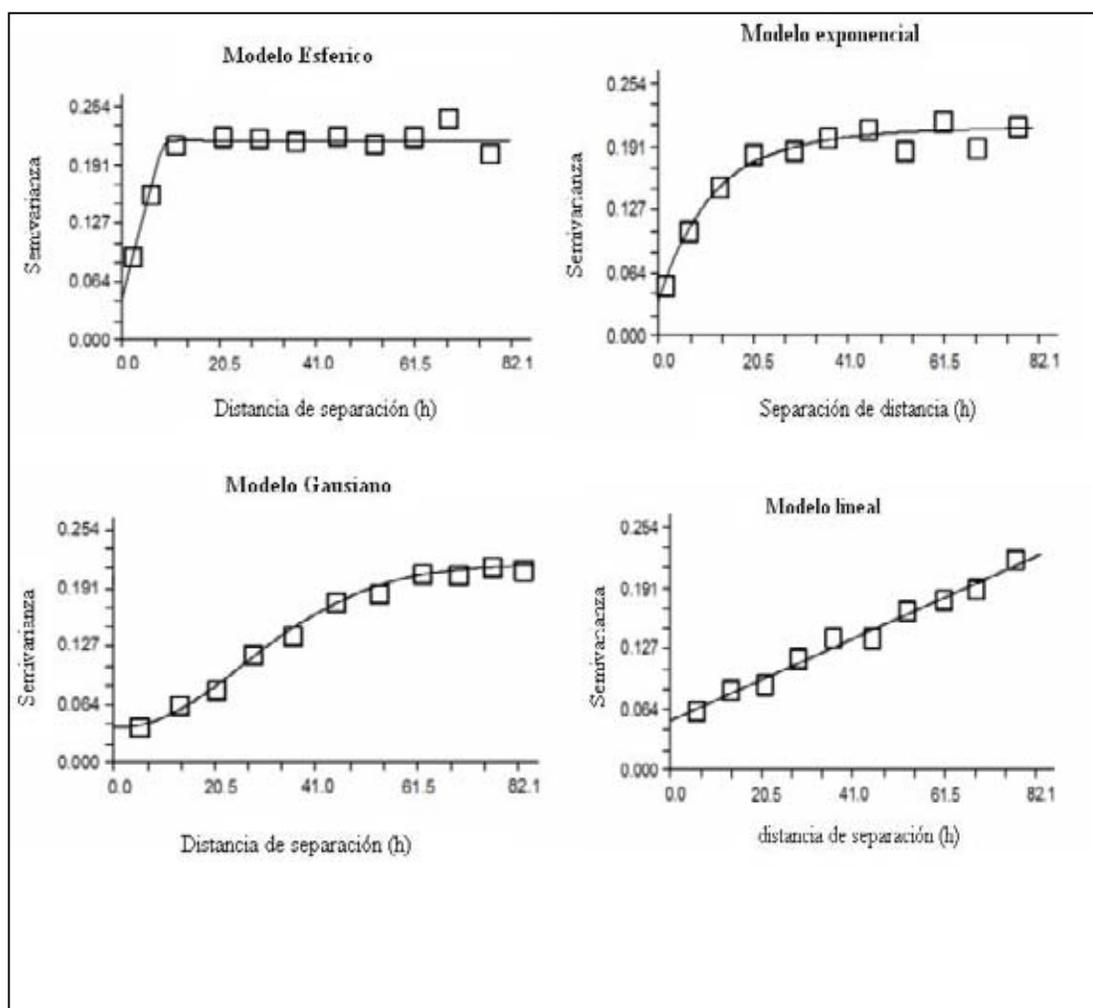


Figura 4. Semivariogramas experimentales y modelos de semivarianza.

FUENTE: Adaptado de GAMMA DESING SOFTWARE (2004).

2.6.5 Isotropía y anisotropía. Se definen las propiedades del suelo como isotrópicas, si ellas varían en similar manera en todas las direcciones. En este caso, el semivariograma depende solo de la distancia que existe entre las muestras, definiéndose un rango circular de dependencia espacial en la región de estudio, sobre cada localización de la muestra (TRANGMAR *et al.*, 1985).

Si la correlación espacial entre los pares de muestras, no sólo depende de la distancia entre ellas, sino que también de la dirección, entonces se dice que existe anisotropía en la región de estudio. Donde el rango describe una elipse en el plano de la distancia, A es el diámetro de máxima variación y representa el rango en la dirección de mayor continuidad espacial y B es el diámetro mínimo de variación y es perpendicular al primero (Zabaleta, 1997, citado por MARDONES, 2003; WEBSTER Y OLIVER, 2001).

La diferencia en la pendiente de los semivariogramas en las diferentes direcciones, revela la presencia o ausencia de dependencia espacial anisotrópica. Si existe anisotropía, el variograma en la dirección de máxima variación, tendrá la mayor pendiente y el variograma en la dirección de menor variación tendrá la menor pendiente (TRANGMAR *et al.*, 1985).

Dentro de la anisotropía se pueden distinguir dos tipos, la anisotropía geométrica y la anisotropía zonal:

1. Anisotropía geométrica: es aquella, en la que la dependencia espacial cambia con la dirección manteniéndose constante el umbral. Esto indica, que la gradiente de variación cambia con la dirección, pero la variabilidad es la misma. Esto caracteriza una zona elipsoidal de influencia que se larga en la dirección de mínima variación. La dirección de máxima variación ocurre perpendicular a la dirección de mínima variación (TRANGMAR *et al.*, 1985; Van Meirvenne, 1997 citado por MARDONES, 2003).

2. Anisotropía zonal: es aquella, que cambia con la dirección pero su rango se mantiene constante. Esto quiere decir, que la variación es diferente de acuerdo a la dirección, pero la extensión espacial es igual. Esto da como resultado diferentes umbrales o diferentes formas de semivariogramas, calculados para la misma propiedad en diferentes direcciones. Generalmente, la anisotropía zonal pura, es difícil de encontrar, dándose más comúnmente, una mezcla entre anisotropías zonales y geométricas (TRANGMAR *et al.*, 1985; Van Meirvenne, 1997 citado por MARDONES, 2003).

Según Richter (1990) y Van Meirvenne (1997), citado por MARDONES (2003), señalan, que para el análisis del comportamiento de una variable anisotrópica, como primera aproximación, se debiera considerar por lo menos cuatro direcciones, cada una con una tolerancia angular de más o menos 22.5°. Al no observar diferencias claras, entonces se puede calcular un semivariograma isotrópico.

2.6.6 Estimación o predicción kriging. La mayoría de las propiedades ambientales, pueden ser medidas en un número infinito de lugares, pero en la práctica ellas son medidas sólo en algunos pocos; esto mayormente por razones económicas. Para extrapolar la información hacia sectores no muestreados, se debe hacer una estimación a partir de los datos obtenidos y, de esta forma, estimar datos de áreas en las cuales las propiedades no pueden ser medidas o no son observables directamente (WEBSTER y OLIVER, 2001).

La estimación, es una de las razones por la cual la geoestadística fue desarrollada y, esta es comúnmente llamada kriging, en reconocimiento a D.G. Krige, quien contribuyó a mejorar la precisión en la estimación de las concentraciones de oro y otros minerales en los yacimientos y reservas recuperables (WEBSTER y OLIVER, 2001).

Kriging, es una técnica que hace una estimación imparcial de la variable regionalizada en localizaciones no muestreadas, usando la propiedad estructural del semivariograma y los valores de los datos iniciales (TRAGMAR *et al.*, 1985). Las formas más simples de kriging, desarrollan una estimación para valores de puntos (kriging puntual) o por áreas (kriging de bloques) y asume que los datos de la muestra están distribuidos normalmente y son estacionarios (Henley, 1981, citado por TRAGMAR *et al.*, 1985).

El kriging ordinario, es el tipo más común de kriging que se utiliza en la práctica, este asume que el promedio es desconocido. Kriging, da un significado a la estimación local, en el cual cada estimación es un promedio cargado de los valores observados en una vecindad. Los valores interpolados de la variable regionalizada z , en la localización x_0 es:

$$\bar{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (2.18)$$

donde, n es el número de muestras cercanas $z(x_i)$ y λ_i son los pesos aplicados a cada $z(x_i)$ (WEBSTER y OLIVER, 2001; TRAGMAR *et al.*, 1985), los pesos son elegidos de modo que la estimación $\hat{z}(x_0)$ del valor verdadero $z(x_0)$ es imparcial.

$$E [\hat{z}(x_0) - z(x_0)] = 0 \quad (2.19)$$

Y la estimación de la varianza σ_k^2 es minimizada

$$\sigma_k^2 = \text{VAR} [\hat{z}(x_0) - z(x_0)] = \text{MINIMO} \quad (2.20)$$

(TRAGMAR *et al.*, 1985).

Para asegurarse que la estimación es imparcial, la predicción es hecha en forma tal que la suma sea 1:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (2.21)$$

(OLIVER Y WEBSTER, 2001).

Y su única combinación para cada σ_k^2 es minimizada, y puede ser obtenida como:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x_0) \quad \text{Para todo } i \quad (2.22)$$

El valor $\gamma(x_i, x_j)$ y $\gamma(x_i, x_0)$ son la semivarianza o, preferentemente, la covarianza (estacionaria de segundo orden), entre localizaciones observables x_i y x_j y entre localizaciones observadas x_i y localizaciones interpoladas x_0 , respectivamente. Estos valores son obtenidos desde el semivariograma de Z (TRAGMAR *et al.*, 1985).

2.7 Aplicaciones de la geoestadística.

La geoestadística, nació como una herramienta práctica para resolver problemas en ingeniería de minas, posteriormente la utilidad potencial de los métodos geoestadísticos en edafología, fue reconocida en los años setenta por los grupos de trabajo de las universidades de Davis (California) y Oxford (Inglaterra) interesados en el estudio de la variabilidad del suelo (ULLOA *et al.*, 2003).

Inicialmente, la aplicación de la geoestadística se centró en estudios de física de suelos, donde ya se tenía conocimiento de los problemas de la variabilidad espacial, así como de la influencia del efecto de escala sobre la determinación de diversos

parámetros. Posteriormente, la geoestadística se aplicó a la evaluación de suelos y más tarde a la fertilidad y análisis de problemas de contaminación (ULLOA *et al.*, 2003).

La principal contribución de la geoestadística en la investigación de suelos, es determinar la estructura de la variación de suelo y su uso para estimaciones locales. El semivariograma, provee una herramienta cuantitativa para relacionar la estructura inherente de la variación en propiedades específicas a efectos espaciales de los factores de formación y procesos, incluyendo los efectos del manejo de suelo (TRAGMAR *et al.*, 1985).

La geoestadística, puede ser usada en estudios de suelos, para análisis estructurales de la variación del suelo, ayudando al entendimiento de la génesis del suelo y para el análisis de datos de reconocimiento, ayudando a definir futuras poblaciones de muestreos (TRAGMAR *et al.*, 1985). La versatilidad y rangos de programas computacionales geoestadísticos ahora disponibles, hacen el análisis espacial de los fenómenos naturales aplicable a muchas áreas de la investigación agronómica (TRAGMAR *et al.*, 1985).

Los análisis de la respuesta espacial en el crecimiento de cultivos, la variabilidad de las propiedades del suelo, tales como la disponibilidad de nutrientes, disponibilidad de agua, penetración de las raíces, pueden contribuir al entendimiento agronómico del rol de los efectos espaciales de la relación suelo-planta. El análisis geoestadístico de la incidencia en plagas y enfermedades que atacan a los cultivos, puede ayudar a la identificación de recursos espaciales en cada ataque (TRAGMAR *et al.*, 1985). Por ello, se ha postulado que el análisis geoestadístico de la variación espacial de fenómenos naturales, tiene un gran potencial de aplicación en la investigación agronómica (TRAGMAR *et al.*, 1985).

3. MATERIAL Y METODO

3.1 Materiales.

Los materiales utilizados en el desarrollo del presente estudio son los siguientes:

3.1.1 Área de muestreo. El muestreo se realizó en un Andisol de la X Región, Chile, serie Osorno ubicada aproximadamente entre las coordenadas 670000 N, 5550000 E por el norte y 670000 N y 5470000 E por el sur, abarcando una superficie de muestreo de 15.000 ha, aproximadamente. Las muestras fueron recolectadas en sectores con distintos sistemas de manejos (praderas, bosque nativo y cultivos).

3.1.2 Materiales de muestreo. Los instrumentos utilizados en la extracción de las muestras fueron los siguientes: pala, cuchillo, bolsas de nylon y marcador permanente; para la localización exacta de los puntos muestreados se utilizó sistema de posicionamiento global (GPS) Garmin datum WGS 84,

3.1.3 Materiales utilizados en el secado de muestras y laboratorio. En el secado de las muestras se utilizaron los siguientes materiales: papel de diario, tamiz (2 mm), marcador permanente y bolsas plásticas. Para la etapa de laboratorio, los materiales utilizados fueron los siguientes: frascos plásticos, balanza analítica Metler, espátula, marcador permanente, agitador orbita Gerhardt, embudos, filtros de papel Whatman N° 2 y pH metro. Para la calibración de pH. se usaron los reactivos acetato de amonio y ácido acético.

Para la lectura de las determinaciones de Al extractable se utilizó un espectrofotómetro UV-visible GBC 919.

3.1.4 Programas computacionales. Excel v. 7.0 (Microsoft ®), programa Geoestadístico GS⁺ Plus versión 7.0 (Gamma Desing Software) y programa para

elaboración de mapas de contorno y superficie Surfer v 6.0 (Golden Software) y ArcView 3.3 ® GIS (Copyright © 1998, 1999).

3.2 Método

La metodología utilizada en el desarrollo del estudio fue la siguiente:

3.2.1 Método de muestreo. La selección de los puntos a colectar, se realizó con un mapa de la serie Osorno PAF (Proyecto Aereofotogrametrico) proyectados sobre mapas 1:50000 del Instituto Geográfico Militar, en el cual se diseñó un muestreo de tipo retículo irregular. Para ello, se seleccionaron 150 puntos, los cuales fueron determinados en forma aleatoria y abarcando la mayor zona posible de muestreo dentro de la serie Osorno. A cada punto se le determinó las coordenadas (UTM), las cuales fueron ingresadas al GPS para facilitar la posterior recolección en terreno de las muestras. En el Anexo 1, se muestra la distribución de los puntos de muestreo en la serie Osorno.

Las muestras fueron colectadas con palas en dos profundidades de muestreo: 0-10 cm y de 10-20 cm. Cada muestra fue georeferenciada con el sistema de posicionamiento global (GPS) Datum WGS 84, para luego ser transformado a Datum WGS 56.

De esta forma, en total se obtuvieron 300 muestras, las cuales fueron llevadas al laboratorio del Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, de la Universidad Austral de Chile, donde fueron secadas a una temperatura constante de aproximadamente 20° C y tamizadas a 2 mm, en una sala de secado de suelos.

3.2.2 Determinación de aluminio extractable. Se realizó la determinación de aluminio extractable para todas las muestras obtenidas en terreno y a las dos profundidades, de acuerdo a los procedimientos señalados en Black *et al.* (1965)

(extracción con acetato de amonio (NH_4OAC), pH 4.8 y concentración 1 M) y ratificados por SADZAWKA *et al.* (2000).

3.2.3 Análisis estadísticos. Las muestras fueron analizadas mediante parámetros estadísticos tradicionales y geoestadísticos.

3.2.2.1 Análisis estadístico tradicional. El conjunto de datos, fue sometido a un análisis estadístico univariado, en el cual se calcularon parámetros estadísticos básicos como la media, desviación estándar, valores máximos y mínimos y coeficiente de variación. Esto se realizó, para la concentración de Al extractable (mg kg^{-1}) de las muestras obtenidas a las dos profundidades (0-10 y 10-20 cm). Además, se determinó la normalidad de los datos mediante los coeficientes de simetría (skewness) y de agudeza (kurtosis).

3.2.2.2 Análisis geoestadísticos. Los datos, fueron analizados con el programa geoestadístico GS⁺ plus versión 7.0. Las muestras fueron ingresadas como coordenadas geográficas (valores x,y) y las concentraciones de Al extractable, fueron puestas en una tercera columna, como un atributo del punto (valor z). Lo anterior, se realizó por separado para las dos profundidades.

Se siguieron las recomendaciones de MORAL (2003) para el análisis geoestadístico y se realizaron las siguientes etapas:

- Análisis exploratorio de los datos: se estudian los datos muestrales sin tener en cuenta su distribución geográfica. Comprobando la consistencia de los datos, eliminándose los erróneos e identificándose las distribuciones de las que provienen.
- Análisis estructural: estudio de la continuidad espacial y de la variable. Se calcula el variograma u otra función que explique la variabilidad espacial y se ajusta al

mismo un variograma teórico. En este caso, para la descripción de la estructura de correlación espacial de los datos, se realizó el semivariograma y el correlograma. Este último, para verificar los resultados obtenidos en el análisis de semivarianza.

- **Predicciones:** estimaciones de la variable en los puntos no muestrales, considerando la estructura de correlación espacial seleccionada e integrando la información obtenida de forma directa en los puntos muestrales, así como la conseguida directamente en forma de tendencias conocidas. Para esto se realizó un análisis de interpolación de los puntos no muestreados con el método de interpolación kriging puntual.

3.2.4 Análisis de superficie. A través de los programas GS⁺ V 7.0 y Surfer V 6.0, se realizó el análisis de superficie, con el fin de diseñar mapas que muestren la distribución de los datos y la concentración de Al extractable (mg kg^{-1}), dentro de la unidad estudiada. Para ello, se utilizó el método de interpolación kriging puntual, utilizando los parámetros obtenidos a partir de los análisis de los semivariogramas, tales como modelo, varianza nugget, rango de dependencia espacial y semivarianza estructural.

4. PRESENTACION DE RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Análisis estadístico descriptivo.

Antes de realizar el análisis geoestadístico, se realizó un análisis estadístico tradicional, que caracteriza los atributos más relevantes de los datos obtenidos en terreno. Los parámetros revisados en esta sección son el promedio, valores máximos y mínimos, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación y normalidad de los datos, en base a los coeficientes de simetría (skewness) y kurtosis.

Se debe mencionar además, que del conjunto de datos fueron eliminados, previo análisis exploratorio, ciertos valores por encontrarse dentro del porcentaje de datos que pudieran estar sujetos a errores de muestreo o que no son representativos de la zona de estudio. Esto correspondió a un solo valor de los 150 datos muestreados, eliminándose de ambas profundidades, para evitar que afectara el posterior estudio geoestadístico.

4.1.1 Promedio y media, máximo y mínimos. En el Cuadro 2, se presentan los valores de promedio y valores máximos y mínimos de las dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm de profundidad). Estas medidas de localización, representan estadísticos de tendencia central e indican valores de distribución.

En el estudio realizado por IREN - UACH (1978), el valor modal encontrado para el Al extractable en la serie Osorno fue de 667 mg kg^{-1} , a una profundidad de muestreo de 16 cm. Este valor fue similar al determinado en este estudio, principalmente como promedio de los primeros 10 cm de muestreo. En el estudio citado, en las mayores profundidades de muestreo (Cuadro 1), se observa que este valor presenta continuidad en profundidad y sólo varía levemente.

En este trabajo, al comparar los valores del promedio de cada profundidad muestreada, el valor de la profundidad de 10-20 cm fue la mayor (803.2 mg kg^{-1}). Al

comparar estadísticamente ambos valores (test de t; p: 0.01) para las dos profundidades de muestreo, estos presentaron una diferencias significativas ($P = 0.0007$). Por lo tanto, las medias de ambas profundidades (0-10 cm y 10-20 cm) provendrían de diferentes poblaciones. Ello se debería a que el suelo presenta una discontinuidad litológica, lo que ha sido evidenciado anteriormente en los análisis de arcilla (IREN, 1978). Sin embargo, esta variación no significa necesariamente, que la variable, en el área de estudio, pueda presentar un comportamiento espacial distinto en las dos profundidades. La diferencia en los depósitos pero el mismo comportamiento espacial que podrían presentar, estaría sugiriendo que el mecanismo de transporte del material parental formador de estos suelos es el mismo.

En relación a los valores máximos y mínimos (Cuadro 2), se observa que existe un rango de amplitud de 1.461 mg kg^{-1} para la profundidad de 0 a 10 cm y de $2.051,5 \text{ mg kg}^{-1}$ para la profundidad de 10 a 20 cm, lo que indica, que existe una alta variabilidad entre las concentraciones de Al extractable en el área de estudio a las dos profundidades. Estos resultados confirman lo señalado por VERA (2003), quien indica que entregar un solo valor para las concentraciones de Al extractable podría ser desfavorable, ya que en una área tan extensa como es una serie de suelo, existe una variación bastante amplia de las concentraciones. Ello está ratificado por los altos valores de la desviación estándar (Cuadro 2) que presentan las mediciones realizadas.

4.1.2 Varianza y desviación estándar. En el Cuadro 2, se presentan los estadísticos desviación estándar y varianza; estas medidas indican la variabilidad de los datos con los cuales se esta trabajando. Valores altos de desviación estándar indican la alta variabilidad presente en el conjunto de datos; esto corrobora lo mencionado anteriormente con los valores máximo y mínimo.

4.1.3 Coeficientes de variación. El Cuadro2, muestra el coeficiente de variación tanto para la profundidad de 0-10 cm, como para la profundidad de 10-20 cm.

Los valores encontrados para el coeficiente de variación, a las dos profundidades de muestreo, fueron parecidos, indicando además una alta variabilidad en los datos. Según Jaramillo, citado por JARAMAL (2002), los valores de coeficiente de concentración para elementos químicos que presentan suelos Andisols del oriente de Antioqueño, Colombia, van desde un 25 a un 400 %, por lo tanto, los valores encontrados para este estudio, en Al extractable se incluirían dentro de los rangos mencionados para suelos Andisoles.

La profundidad de muestreo de 10-20 cm, presenta un valor ligeramente más alto de coeficiente de variación que la profundidad superficial (0-10 cm). Sin embargo, esta variación puede ser considerada similar. Ello parece ratificar que la variabilidad entre los puntos distribuidos espacialmente descrita es similar tanto para la primera profundidad como en la segunda profundidad analizada. En estudios anteriores (MARDONES, 2002), al comparar el mismo suelo sometido a manejos distintos, un sistema de rotación y otro a pradera permanente, se encontró que todos los elementos en la pradera permanente aumentan su coeficiente de variación. Este efecto fue atribuido a la no alteración del suelo por el laboreo. A pesar de ello, en el mismo estudio, el aluminio disminuyó su coeficiente de variación en profundidad, pero la diferencia con este estudio, se podría deber a que en el estudio realizado por MARDONES (2002), se midió la concentración de Al intercambiable, el cual presentaría una mayor variación en el suelo y que además este se realizó en un superficie reducida (1 ha). Se debe considerar también que el Al intercambiable no es dependiente del tipo de arcilla como si lo es el Al extractable.

4.1.4 Coeficiente de simetría y kurtosis. En el Cuadro 2, se muestran los estadísticos de simetría y kurtosis, los cuales fueron calculados a través del programa GS⁺. Estos estadísticos indican cómo se comporta la distribución de los datos respecto a la distribución normal.

La distribución de los datos es simétrica, presentando valores cercanos a cero y encontrándose dentro de los valores permitidos para ser considerados una distribución normal. MARDONES (2002), consideró una distribución normal si sus coeficientes de distribución tomaban un valor máximo de ± 2 . Para las dos profundidades, ambos coeficiente fueron positivos, lo que indica que la distribución presenta una leve simetría a la derecha.

En relación al coeficiente de kurtosis, los valores fueron de 0.03 a la profundidad de 0 a 10 cm y de < 0.01 para la profundidad de 10 a 20 cm, esto indica que para ambas profundidades, la distribución puede ser asumida como normal.

CUADRO 2. Parámetros estadísticos para el aluminio extractable para dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm).

Parámetro estadístico	Profundidad de muestreo (cm)	
	0 – 10	10 – 20
Promedio (mg kg ⁻¹)	649.5	803.2
Máximo (mg kg ⁻¹)	1574,4	2162.2
Mínimo (mg kg ⁻¹)	113.4	110.7
Varianza	108879	194911
Desviación estándar	329.9	441.4
Coef. variación	50.9	54.9
Skewness	0.54	0.68
Kurtosis	0.03	0.00

En la Figura 5, se observan los histogramas de frecuencia presentados para ambas profundidades (0-10 cm y 10-20 cm), los cuales representan la distribución de los datos y su simetría.

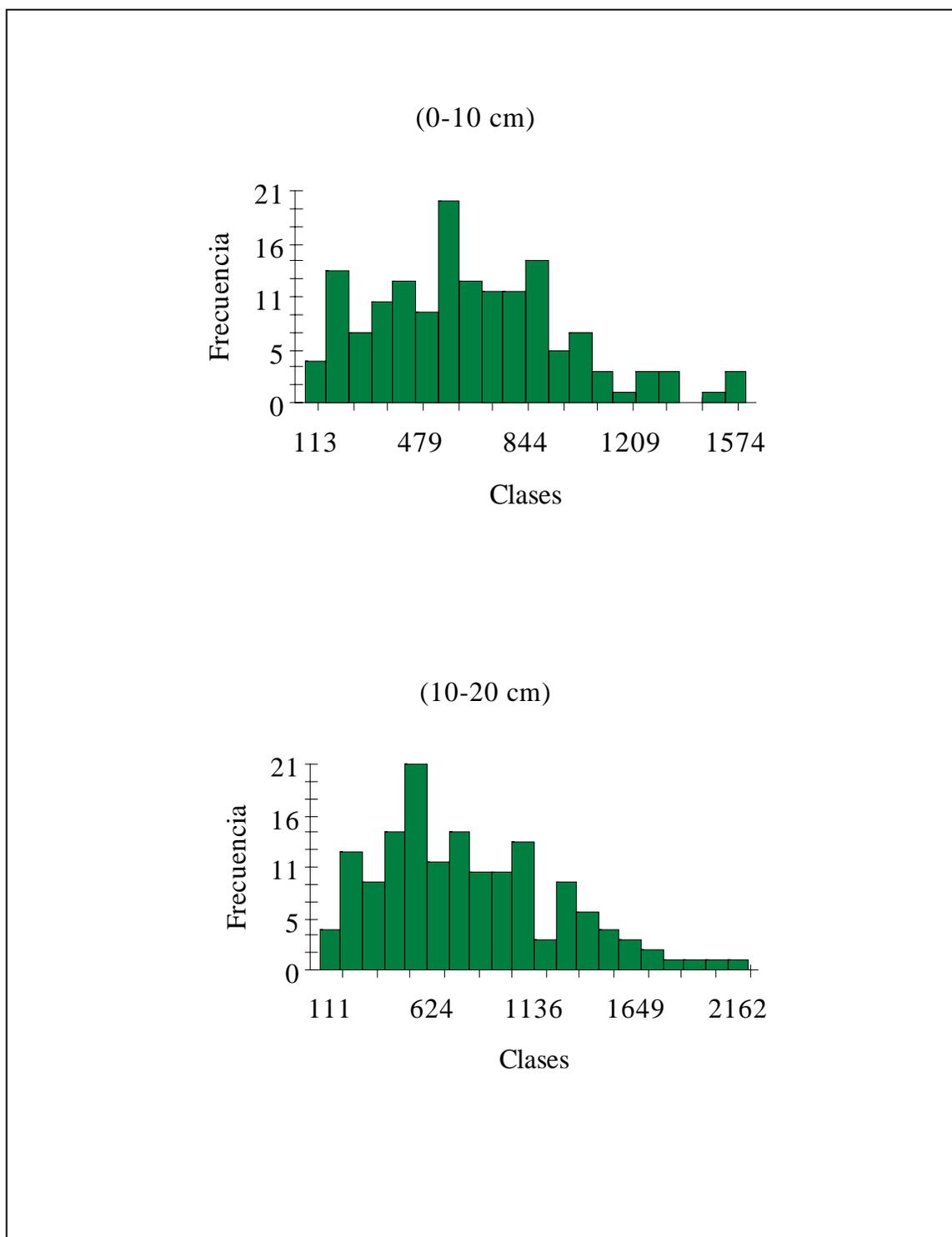


FIGURA 5. Histogramas de frecuencia para aluminio extractable en dos profundidades, 0-10 cm y 10-20 cm.

4.2 Análisis geoestadísticos.

Para llevar a cabo el análisis geoestadístico, se calcularon los semivariogramas experimentales para ambas profundidades (0-10 cm y 10-20 cm) y el ajuste de los modelos matemáticos, los cuales explican el comportamiento espacial de las muestras en estudio.

Para la construcción del semivariograma, se calculó en primer lugar, la distancia activa de retraso (DRA), la cual representa la distancia en la cual se analizaron los datos. Esta distancia, fue de 38.576,3 m (Cuadro 3) para ambas profundidades y es la distancia donde se logra incluir el máximo de datos utilizados para el cálculo de los semivariogramas. Por defecto, el retraso calculado por el programa GS⁺ es de un 80% del máximo retraso (GAMMA DESING SOFTWARE, 2004).

4.2.1 Semivariograma isotrópico. Se realizó un análisis geoestadístico del semivariograma omnidireccional, es decir, sin variación en la dirección; sus valores se muestran en los variogramas del Anexo 3. Para ambas profundidades, los semivariogramas se presentan como un modelo exponencial, los cuales presentan un coeficiente de correlación (r^2) de 87 y 83% para la profundidad de 0-10 cm y de 20-10 cm, respectivamente.

A pesar de la alta correlación que presenta el variograma ajustado para ambas profundidades, existió una baja proporción ($C_o / C_o + C$) entre C_o (nugget) y C (sill), el valor fue de 0.5 para ambas profundidades. Relaciones de $C_o / C + C$ que oscilan entre 25% y 75%, indican que las muestras poseen dependencia espacial moderada. Esto puede deberse a que al querer tomar las varianzas como iguales y no ser estas así (esto se puede inferir de los mapas de contornos) la dependencia espacial entre las muestra tendería a ser menor y por lo tanto el nugget mayor. A partir de este resultado, fue necesario realizar un análisis de anisotropía del área en estudio. De esta manera, al analizar la variación en función de la dirección se puede determinar una variación en la

dependencia espacial entre las muestras (Cambardella, *et al.*, 1994, citados por SAINATO *et al.*, 1996).

4.2.2 Análisis de anisotropía. Al hacer el análisis anisotrópico, se encontró que al variar los ángulos de dirección, los semivariogramas presentaban variación en la tendencia de los datos del parámetro en estudio.

A pesar que el coeficiente de correlación es menor que el del variograma isotrópico, la dependencia espacial es mayor en el variograma anisotrópico, lo cual estaría mostrando que existe una diferencia en las varianzas de las muestras e implicarían que los modelos de semivariograma son anisotrópicos. Por lo tanto, la correlación espacial entre las muestras no sólo depende de la distancia que existe entre ellas, sino que también, de su dirección. La dirección de máxima variación es de noreste, con un ángulo de 355° respecto al norte, en ambas profundidades. Esto indicaría que está estaría influida por la dirección de la depositación de las cenizas volcánicas, que dieron origen a estos suelos. Además, señalaría que esta se llevó a cabo con una orientación de cordillera hacia el mar y de sur a norte.

La orientación en la depositación de las cenizas que influye en la variabilidad espacial determinada está basado en lo determinado por TRANGMAR (1895), quien señala que la identificación de cambios en la dependencia espacial, al variar la dirección en los modelos anisotrópicos, reflejaría procesos de formación de suelo. Este mismo autor, encuentra que la dirección de máxima variación, en el semivariograma de tipos de partículas de suelo, ocurre bajo la dirección del eje principal de la caída del material formador y las depositaciones aluviales. Dado que el Al extractable sería indicador del tipo de arcilla, no es extraño que este parámetro también obedezca a la formación de suelo como lo hacen las partículas del suelo.

4.2.3 Semivariograma anisotrópico. En el Cuadro 3, se muestran los parámetros geoestadísticos encontrados para el semivariograma anisotrópico. Estos son: efecto

nugget (C_0), umbral o sill ($C_0 + C$), rango de dependencia máximo (A_1) y mínimo (A_2) y coeficiente de determinación (r^2).

Para las profundidades de 0 a 10 cm y 10 a 20 cm, el coeficiente de correlación encontrado fue de 61% y 45%, respectivamente. El valor de la profundidad de 10-20 cm, tuvo un valor de 0.45, el cual mostraría una menor correlación de los datos con respecto al modelo. Esto refleja una menor homogeneidad de los datos a esta profundidad en el área de estudio y reafirma lo determinado a través del coeficiente de variación.

CUADRO 3. Parámetros geoestadísticos para aluminio extractable para dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm).

Parámetros	Profundidad (cm)	
	0-10	10-20
Modelo	Gausiano	Gausiano
D.A.R. (m)	38.576,32	38.576,32
C_0	0.039	0.037
$C_0 + C$	0.188	0.188
A (m)	105.031,5	129.609,3
$C_0 / (C_0 + C)$	0.21	0.20
r^2	0.61	0.45

4.2.3.1 Modelo. El modelo del semivariograma determinado anteriormente con el análisis de anisotropía fue anisotrópico, por lo tanto la variabilidad de las muestras no sólo depende de la distancia que existe entre ellas, sino que también de su dirección.

Para ambas profundidades, el modelo ajustado fue el Gausiano (Figura 6). Este modelo, al igual que el exponencial, se aproxima gradualmente al origen y el rango es un parámetro, donde alcanza el 95% del sill (GAMMA DESING SOFTWARE, 2004).

La presencia de la meseta, estaría mostrando que existe una heterogeneidad en las concentraciones de Al extractable dentro del área de estudio, lo cual podría suponer el cambio en la homogeneidad de la serie. Esto queda más claramente mostrado en el análisis del rango de dependencia espacial. La similitud de los semivariogramas mostraría la continuidad de Al extractable en profundidad. Presentando una tendencia parecidas en ambas profundidades (0-10 cm y 10-20 cm).

4.2.3.2 Rango de dependencia espacial. Corresponde a la distancia en que los valores de la variable estudiada, dejan de tener correlación espacial. Bajo este rango, los valores presentan asociación espacial y sobre él no presentarían dependencia espacial. El rango provee una estimación del área de semejanza entre las muestras. Para el modelo anisotrópico el rango presenta dos valores, uno del eje máximo de variación (A_1) y el otro del eje mínimo de variación (A_2), los cuales son un parámetro del rango. El rango está representado por tres veces la raíz cuadrada de A ($3^{0.5} \times A$), siendo estos los rangos efectivos (YOST *et al.*, 1982 a y GAMMA DESING SOFTWARE, 2004).

Para las muestras de Al extractable, obtenidas a la profundidad de 0-10 cm, el rango del eje de máxima variación (A_1) es de 105.031,5 m, siendo la distancia en que la variable (Al extractable) deja de tener una dependencia espacial. Este valor, es considerablemente más alto que la distancia activa de retraso, presentando un alcance espacial mayor que esta. Esto mostraría que la dependencia espacial del Al extractable se extiende sobre los límites de la distancia tomada para el cálculo de los semivariogramas.

Para la profundidad de 10-20 cm, el rango del eje de máxima variación, fue de un valor de 129.609,3 m. Valores de rango espacial de largo alcance son encontrados en el estudio realizado por YOST *et al.* (1982), el cual señala que los estudios de dependencia espacial realizados a gran escala, son útiles para el entendimiento de la pedogénesis y génesis del suelo.

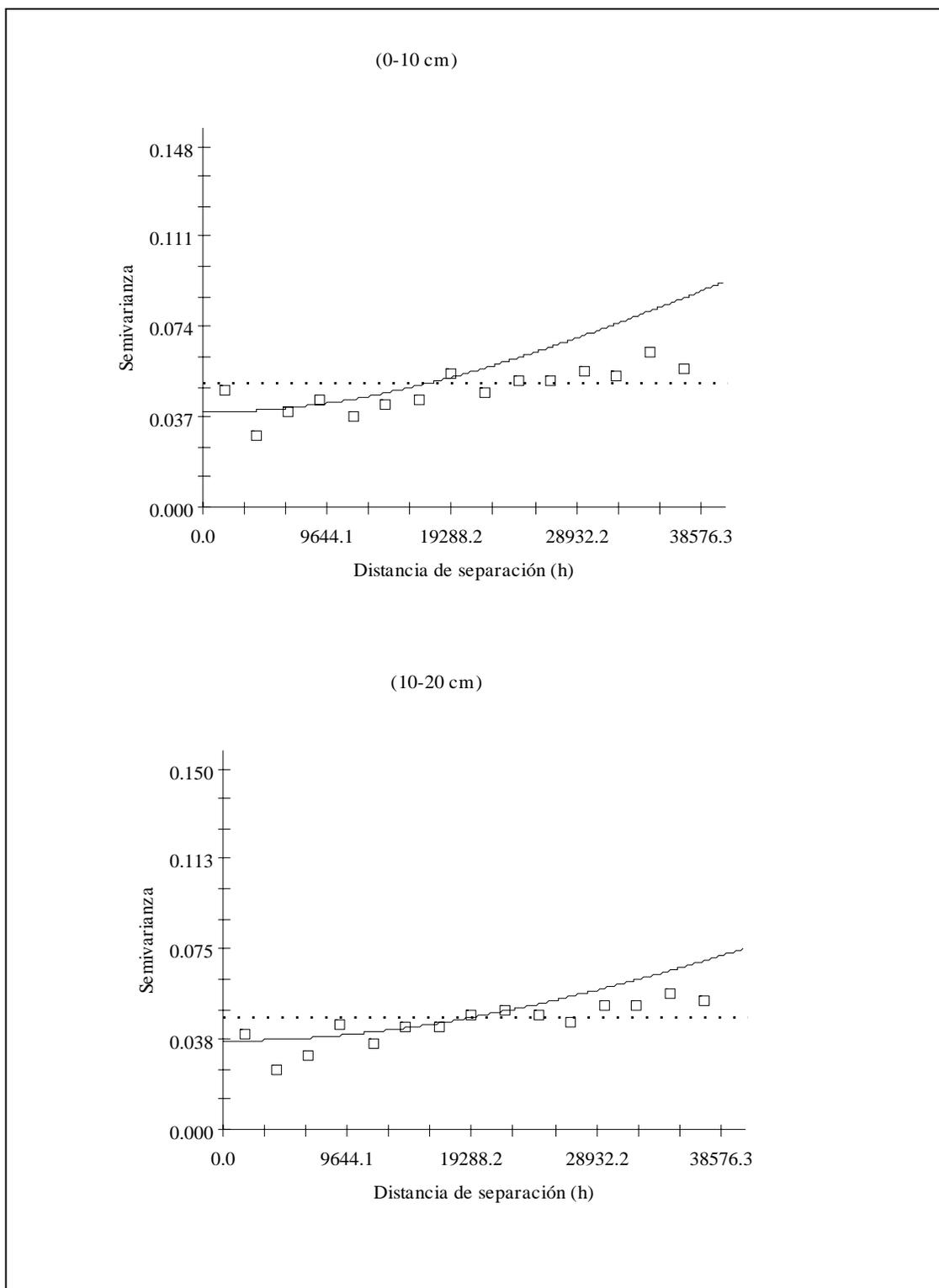


FIGURA 6. Semivariogramas ajustados de Al extractable para dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm).

En cuanto a la proporción $(C_0/C + C)^1$, la cual indica el grado de dependencia espacial de la variable en estudio, presentó valores de 0.21 y 0.20 para las profundidades de 0-10 cm y 10-20 cm, respectivamente, aunque este es considerado solo un valor arbitrario. Según Cambardella (1999), citado por SAINATO (1996), los valores determinados mostrarían la alta dependencia espacial que presenta el Al extractable en el área de estudio, en esta dirección.

4.2.3.3 Efecto nugget. Cuando el semivariograma no pasa a través del origen, se está frente a un efecto nugget, el cual representa una variabilidad inexplicada o aleatoria, la que puede deber a errores en el muestreo o a la microvariabilidad de la propiedad en estudio, la que no es detectada a la escala de muestreo (TRAGMAR *et al.*, 1985).

Para ambas profundidades el efecto nugget es de 0.039 y 0.037 para 0-10 cm y 10-20 cm, respectivamente. El efecto nugget también es expresado como un porcentaje del sill, lo que permite la comparación entre propiedades (Yost *et al.*, 1982a; Burrough, 1983a; Trangmar, 1984, citados por TRANGMAR, 1985). Rangos de efectos nugget van desde 0 a 100% de sill, y valores cercanos a 0% indican que no existen errores de medición significativa presente en rangos cortos de variación (TRAGMAR, *et al.*, 1985). Para este estudio se presentaron porcentajes de 21% y 20% para las profundidades de 0-10 cm y 10-20 cm, respectivamente, lo que estaría mostrando un bajo efecto nugget en el área de muestreo y ratificaría la alta dependencia espacial de Al extractable en este suelo.

En un estudio realizado por VERA (2003) en la serie Pelchuquín, encontró un valor alto de nugget (85%) para el Al extractable, como producto de que en esta serie de suelo el Al extractable no presentó una correlación espacial en el área de estudio y mostró que la serie de suelo Pelchuquín era homogénea.

¹ En GS⁺, la relación $C_0/C+C_0$ se cambia por $C/C+C_0$, por lo tanto el grado de dependencia espacial cambia de fuerte sobre 0,75 y débil bajo 0,25.

4.2.3 Correlogramas. La función de correlación (correlograma), está relacionado con el semivariograma; sin embargo, para que la relación exista debe presentar meseta (ISAAKS y SRIVASTABA, 1989). Esta función permite confirmar el comportamiento que ha sido descrito anteriormente con el semivariograma.

El análisis de correlación, fue obtenido con el programa geoestadístico GS⁺, a través del índice de Moran. Anteriormente, se realizó el análisis de dependencia espacial de la variable en estudio, con el semivariograma. En este punto sólo se hará una breve descripción del índice de Moran, con el objetivo de corroborar lo anterior.

El índice de Moran permitió demostrar que el Al extractable presenta dependencia espacial. Los valores tienden a ser negativos (Figura 7). También indica que no existe una estabilización de la disminución en la autocorrelación para ninguna de las dos profundidades, ya que la distancia a la cual está no disminuye, define el rango sobre el cual las muestras están correlacionadas espacialmente (TRAGMAR *et al.*, 1985). Lo anterior demuestra la existencia del cambio en la dependencia espacial de largo alcance en la variable estudiada a través de la región y, en este estudio, el Al extractable al aumentar la distancia entre muestreos va disminuyendo su correlación espacial.

En los Cuadros 4 y 5, se pueden observar los valores del índice de Moran, los cuales muestran un rango de dependencia más definido, donde la zona de dependencia espacial está representada por el primer valor negativo del índice, que para este estudio, fue de 19.294,5 m para la primera profundidad (0-10 cm) y de 21.901.4 m para la segunda profundidad (10-20 cm). Estos valores, estarían mostrando un cambio en la dependencia espacial de las concentraciones de Al extractable en la serie Osorno.

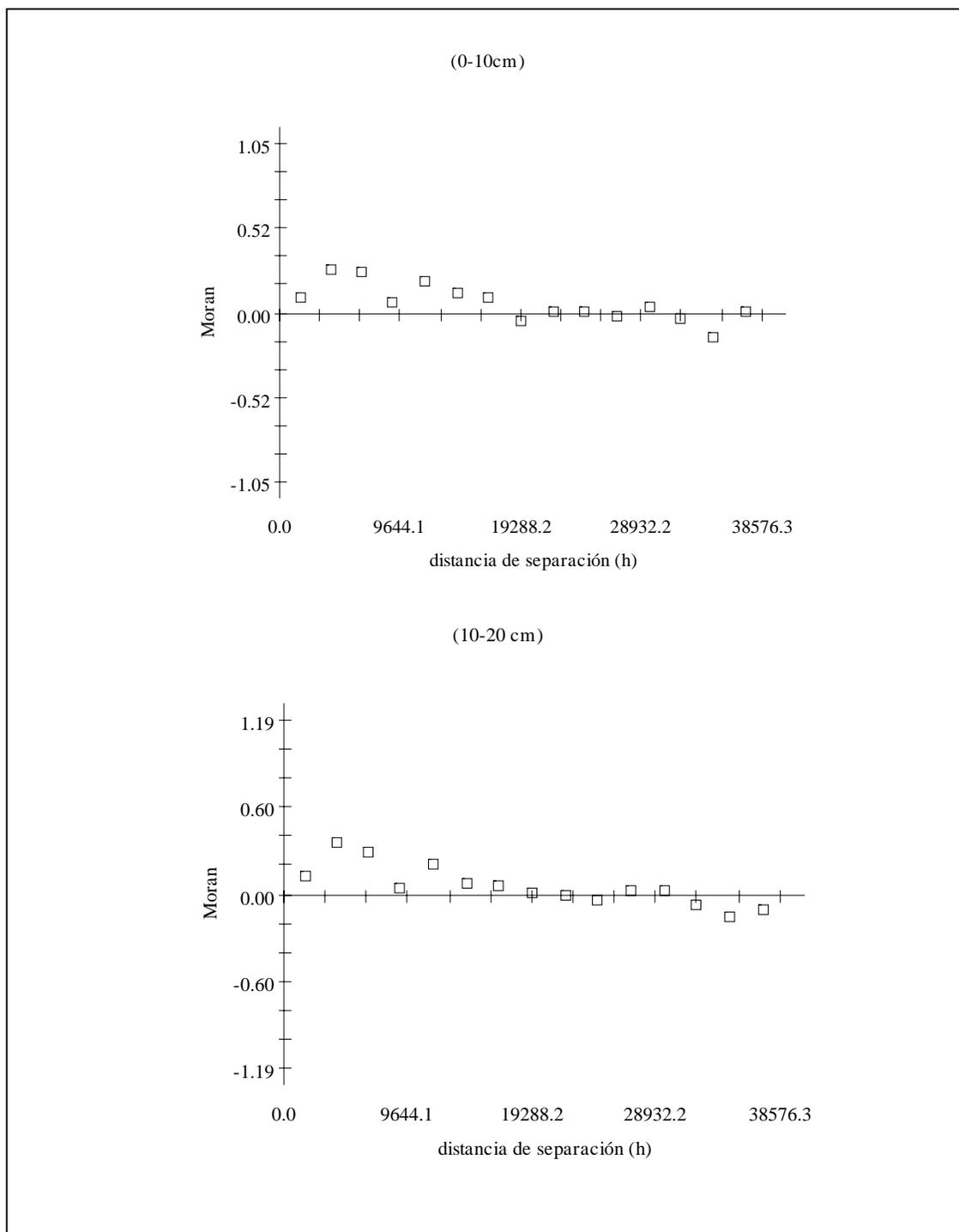


FIGURA 7. Correlograma para Al extractable a dos profundidades (0-10 cm y 10-20cm).

CUADRO 4. Análisis de Moran de aluminio extractable para la profundidad de 0-10 cm.

Clases	Distancia promedio	Moran	Pares
1	1663.29	0.09	27
2	4060.15	0.2715	86
3	6528.84	0.2534	143
4	9073.85	0.0631	168
5	11614.94	0.2025	187
6	14166.70	0.1228	257
7	16732.18	0.0894	269
8	19294.56	-0.0443	272
9	21901.49	0.0125	285
10	24417.72	0.0041	317
11	26996.78	-0.0277	302
12	29549.04	0.0333	298
13	32096.56	-0.0394	283
14	34758.11	-0.1527	260
15	37289.16	0.0043	275

**CUADRO 5. Análisis de Moran de aluminio extractable para la profundidad de 10
20 cm.**

Clases	Distancia promedio	Moran	Pares
1	1663.29	0.1167	27
2	4060.15	0.3469	86
3	6528.84	0.2893	143
4	9073.85	0.0470	168
5	11614.94	0.2091	187
6	14166.70	0.0745	257
7	16732.18	0.0659	269
8	19294.56	0.0081	272
9	21901.49	-0.0053	285
10	24417.72	-0.0358	317
11	26996.78	0.0275	302
12	29549.04	0.0250	298
13	32096.56	-0.0677	283
14	34758.11	-0.1612	260
15	37289.16	-0.1048	275

4.3 Análisis de superficie.

Después de ajustar los modelos del semivariograma al modelo teórico, los valores de Al extractable en los sectores no muestreados fueron estimados a través del método de interpolación kriging puntual, mediante el programa GS⁺ versión 7.0 y Surfer V 6.0. Mediante la interpolación se diseñaron mapas de contorno para la distribución de las concentraciones de Al extractable. Los mapas permiten caracterizar espacialmente una variable y sirven para representar, en forma adecuada las propiedades del suelo (BURGOS *et al.*, 2003).

Se debe señalar, en primer lugar, que existen áreas en los mapas que no fueron muestreados, pero que de igual forma, fueron interpoladas, tomando los valores más cercanos. Esto fue, particularmente, el caso del sector noroeste del mapa (extremo superior izquierdo).

En los mapas de contorno (Figuras 8 y 9), se puede observar que se presentan zonas claramente diferenciadas para la concentración de Al extractable. La disminución de la concentración de Al extractable, presenta una orientación noroeste, lo cual confirmaría la existencia de anisotropía en la zona. Este efecto corrobora los resultados encontrados en el semivariograma anisotrópico presentado en el análisis geoestadístico.

Al comparar ambas profundidades, se observa que la continuidad espacial de la variable en estudio se mantiene. Se observa una baja diferencia en la forma de su distribución espacial. Sin embargo, la dirección noroeste de la disminución en la concentración de Al extractable en el área se mantiene para las dos profundidades, ratificando con ello que se debería a un proceso de depositación del material parental.

La variación encontrada en la serie Osorno, podría ser explicada por depósitos distintos y de diferentes épocas. Sin embargo, dado la forma de la depositación y la similitud presentada de las dos profundidades, cabe la hipótesis que las diferencias en el material parental (Al extractable) sea producto de la distancia de transporte.

Si el Al extractable es un buen indicador del tipo de material parental, los resultados obtenidos en este estudio estarían mostrando que la diferencia encontradas en el material parental de esta serie, podría deberse la distancia de transporte del material parental, más que de la época de depositación de este.

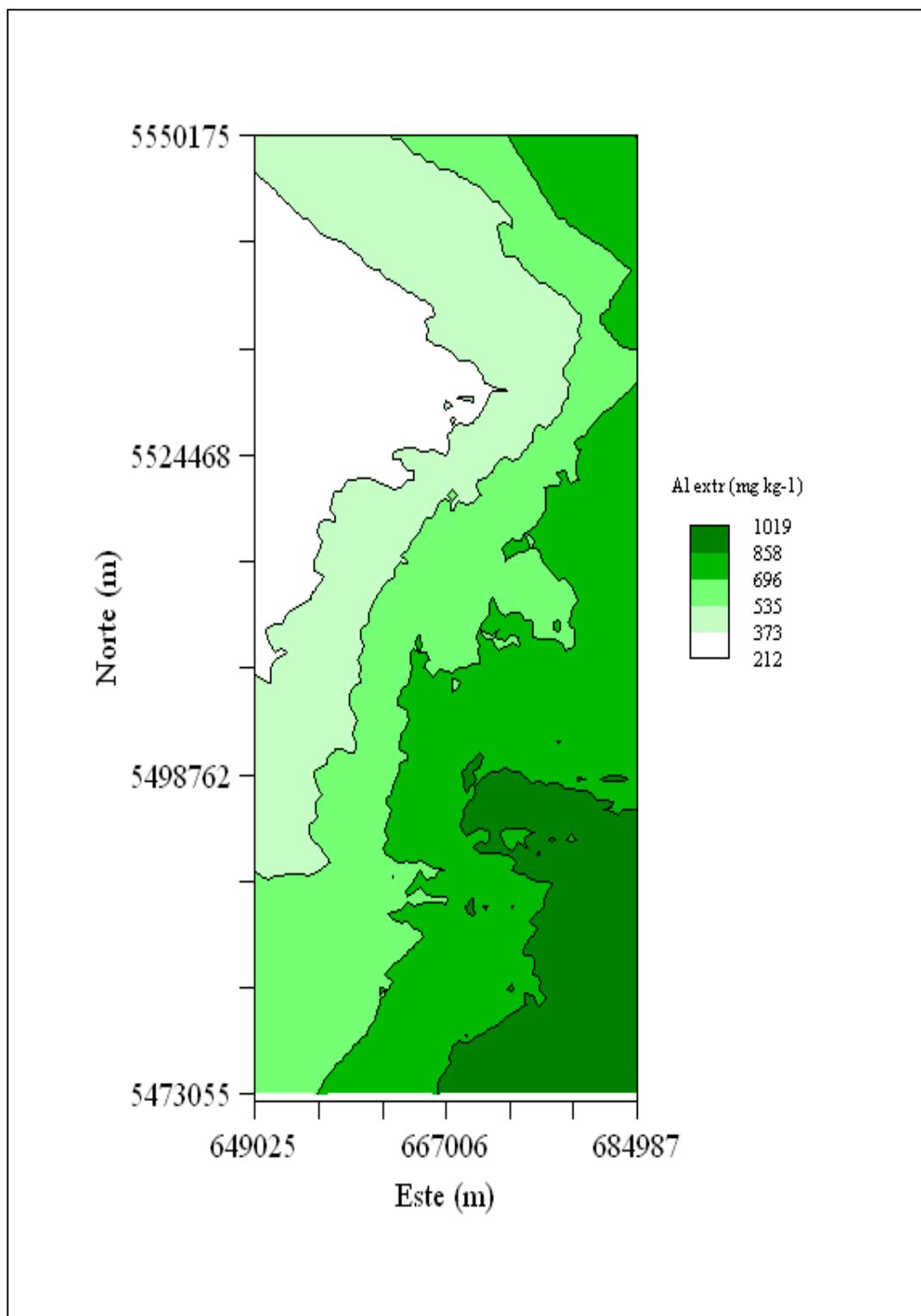


FIGURA 8. Mapa de contorno para Al extractable a la profundidad de 0-10 cm.

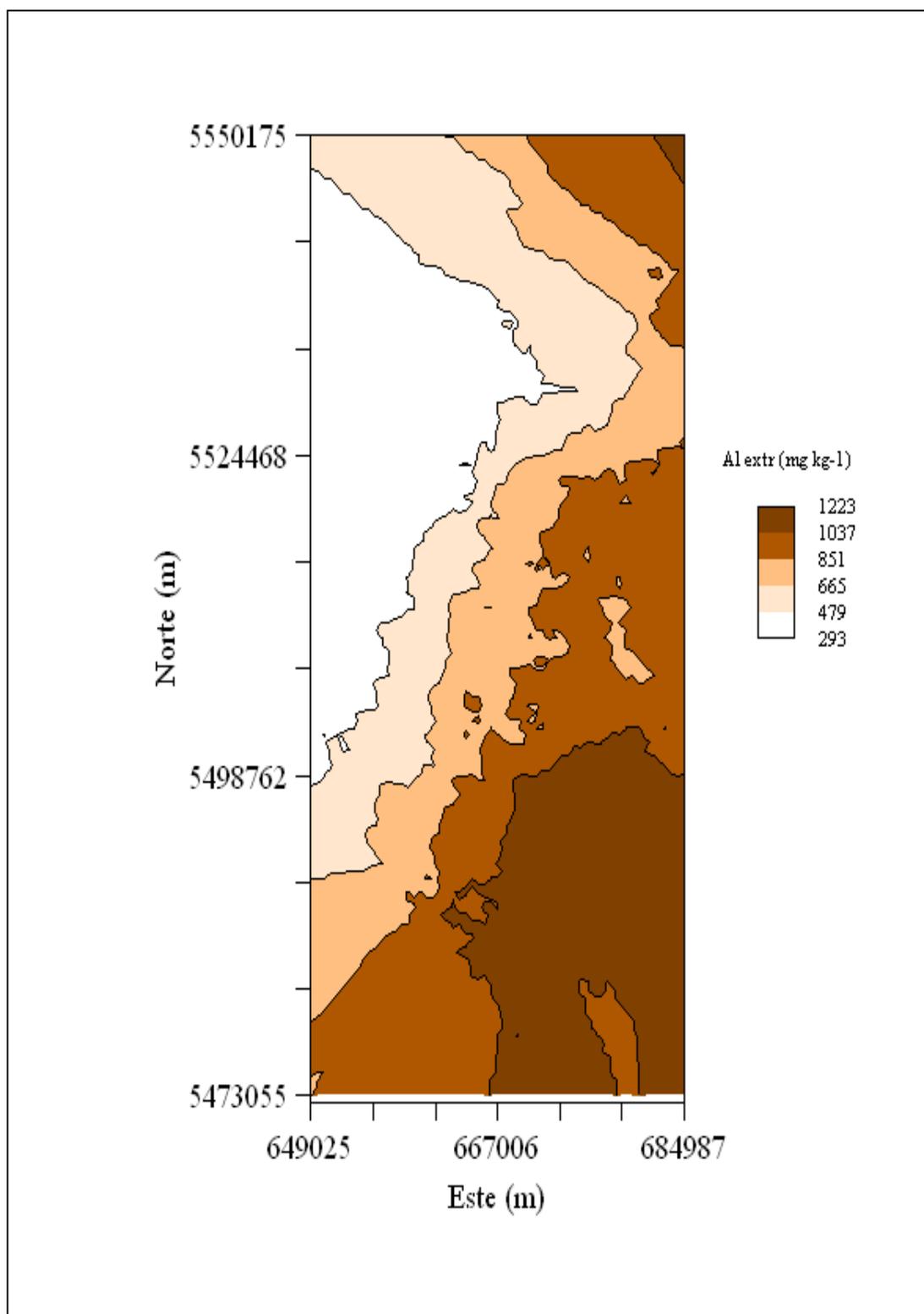


FIGURA 9. Mapa de contorno para Al extractable a la profundidad de 10-20 cm.

5 CONCLUSIONES

Los promedios de las concentraciones de aluminio extractable determinados para las dos profundidades están dentro de los valores reportados generalmente para estos suelos. Los valores de desviación estándar tanto como los valores de coeficiente de variación mostraron una alta variabilidad en las concentraciones de Al extractable en el área de estudio.

A través del análisis geoestadístico se encontró una dependencia espacial entre las muestras, las cuales aumentaron su semivarianza a medida que aumentó la distancia de separación entre ellas. Los valores de rango y de efecto nugget indican la alta dependencia espacial de largo alcance para el Al extractable en la serie Osorno.

El semivariograma ajustado fue anisotrópico para las dos profundidades, lo que mostraría que las concentraciones de Al extractable en el área de estudio no sólo dependen de la distancia entre ellas, sino que también de su dirección.

La dirección de mayor dependencia espacial encontrada fue con un ángulo de 355° y con una orientación norte-oeste, lo que mostraría la orientación de los depósitos de cenizas volcánicas formadores de estos suelos. Además, el Al extractable en el área de estudio, en la dirección de mayor variación mostró un alto grado de dependencia espacial.

Los mapas muestran que la concentración de Al extractable en la serie Osorno presentaría una distribución heterogénea en superficie, pero continuidad en profundidad, con la presencia de anisotropía en el área de estudio, la dirección de la disminución en las concentraciones de Al extractable, sugiere que la dirección de las depositaciones de las cenizas formadoras de estos suelos y la presencia de más de un suelo en el área de las serie Osorno.

6 RESUMEN.

La existencia de diferencias en los estudios de clasificación de la serie Osorno lleva a pensar en la heterogeneidad del material formador presente en esta serie de suelo, lo que hace necesario un estudio de la homogeneidad de las características de la serie. Los tipos de arcillas se encuentran asociados al contenido de aluminio extractable, lo cual implica, que al realizar un estudio de variabilidad espacial del Al, se podrían determinar zonas homogéneas en la serie de suelo o por lo menos del material generador.

Para este estudio se realizó un muestreo de tipo retículo irregular en un Andisol de la Décima Región de Chile, serie Osorno, seleccionado 150 puntos de muestreo. Las muestras fueron tomadas a dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm.) obteniéndose en total 300 muestras. Cada muestra fue georeferenciada con GPS. A cada muestra se le determinó el aluminio extractable en acetato de amonio pH 4.8 1M.

Las muestras fueron analizadas con métodos estadísticos tradicionales y con métodos geoestadísticos, determinando semivariogramas, existencia de anisotropía y generación de mapas mediante Kriging puntual.

Se encontró que el modelo de ajuste para las dos profundidades presenta un semivariograma anisotrópico; esto indica que existe dependencia espacial variable para el parámetro Al extractable y por lo tanto, no sólo depende de la distancia que existe entre las muestras, sino que también de la dirección.

La proporción que muestra la existencia de dependencia espacial (C/C_o+C), fue de 0.21 para la profundidad de 0-10 cm y de 0.20 para la profundidad de 10-20 cm, esto implica alta dependencia espacial para el Al extractable en la serie de suelo.

La mayor variación se encontró en dirección noroeste, con un ángulo de 355° respecto del norte, en ambas profundidades. El rango de dependencia espacial encontrado para la profundidad de 0-10 cm fue de 105.308,6 m y para la profundidad de 10-20 cm fue de 129.609,3 m. Lo anterior sugiere, que existen diferencias en los depósitos de cenizas volcánicas, lo cual indicaría que la serie Osorno no es una unidad de suelo homogénea.

SUMMARY.

The existence of differences in the determination of the Osorno soil series in different soil surveys, leads to suppose that there is little homogeneity in the parent material present in the area and therefore the homogeneity of the soil characteristics should be studied. The types of clay are associated with the amount of extractable aluminium which permits, by means of the study of the spatial variability of the Al, to determine the homogeneity of a soil series, or at least of its parent material.

In this research an irregular grid sampling was used on an Andisol of Decima Region of Chile, selecting 150 points. The samples were obtained from two depths (0-10 cm and 10-20 cm), totalling 300 samples. Each of the soil samples was georeferenced with a GPS. The aluminium with ammonium acetate 1M and pH 4.8 was determined.

Traditional statistical analysis was applied to the values of extractable Al, and with geostatistics semivariograms and the existence of anisotropy was determined, generating, by point kriging, surface maps of the area.

For both depths the adjusted models for the semivariograms were anisotropic, indicating the existence of a differentiated spatial dependence for the extractable Al, and therefore, it not only depends of the distance between samples but also of the direction.

The relation that indicates the spatial dependence (C_0/C_0+C), was of 0,79 for the 0-10 cm depth and of 0,80 for the 10-20 cm, indicating a high spatial dependence for the extractable Al in this soil series.

The largest variation was found in the north-west direction, with an angle of 355° with respect to the north, for both depths. The distance of spatial dependence found for

the 0-10 cm was of 105.308,6 m and for the 10-20 cm depth was of 129.609,3 m. These result suggest that there exists differences in the volcanic ash deposits, which would also imply that the Osorno soil series is not a homogeneous soil unit.

7 BIBLOGRAFIA

- APEZTEGUIA, H., SREN, R., AOKI, A., ATECA, M., ROMERO, L., MENDOZA, R., ESMORIZ, G. y ROBLED, C. 1999. Distribución espacial de la humedad del suelo en una microcuenca de Córdoba, Argentina. *Agricultura Técnica, Chile* 59(3):233-241.
- ALAMOS P., BEHRENS H., ACEVEDO., E., LOPES A., y PALMA T. 1967. Relaciones suelo-fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agricultura Técnica, Chile* 27(13):121-129.
- BESOAIN E. Y SEPULVEDA G. 1981. Características físicas y propiedades de algunos Dystrandeps de la Región de Los Lagos, sur de Chile. I. Mineralogía, génesis y propiedades de los suelo. *Agricultura Técnica, Chile* 41(4):197-220.
- BURGOS P., MADEJÓN E., PÉREZ DE MORA A., GIRÓN I., y CABRERA F. 2003. Propiedades físico-químicas y variabilidad espacial de un suelo afectado por el vertido minero de Aznalcóllar. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS-CSIC). <<http://www.zonanosaturada.com/publics/V6/p219-222.pdf>> (9 Diciembre, 2004).
- BONOMELLI, C., BONILLA, C. y VALENZUELA, A. 2003. Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Santiago, Chile. *Pesq. Agropec. Bras.* 38 (10):1179-1186. <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttex&pid=s0100-204X2003001000007&lng=en&nrm=iso&tlng=es> (9 Diciembre, 2004).

- BRADY, N. y WEIL, R. 2000. Elements of the nature and properties of soil, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. United States of America. 559 p.
- CUADOR, J, 2003 elementos de la geoestadística; Universidad de Pinar del Río, Ecuador <<http://www.monografias.com/trabajos14/geoestadística/geoestadística.shtml>> (10 Diciembre, 2004)
- CHILE, INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACION DE RECURSOS NATURALES Y UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE (IREN-UACH) 1978. Estudio de suelos de la provincia de Valdivia. Santiago, Chile. 178 p.
- DIAZ, C. y RAY, R. 1960 Agricultura técnica, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile. 423 p.
- ENGINEERING STATISTIC HANBOOK 2004. Measures of skewness and kurtosis. <www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35b.htm> (10 Diciembre 2004)
- GAMMA DESING SOFTWARE, 2004. GS⁺ Geostatistics for the Environmental Sciences, Plainwell, Michigan USA. 168 p.
- HENRIQUEZ, M. y VILORIA, J. 1999. Número de observaciones para estimar semivariogramas de algunas propiedades de suelo y distancias de muestreo. Agronomía Tropical 49(1):5-17. <<http://www.redpav-fpoar.info.ve/agrotrop/v49-1/a491a001.html>> (10 Diciembre 2004).
- ISAAKS, E. y SRIVASTAVA, R. 1989. An introduction to applied geostatistics, New York, Oxford University Press Inc. 561 p.

- JARAMAL 2002. Variabilidad de las propiedades del suelo. <<http://www.unalmed.edu.co/~djaramal/variabilidad-suelos.pdf>> (01 Diciembre 2004).
- LINDSAY, W. 1979. Chemical equilibria in soil, Wiley, Chicago, United State of America. 449p.
- MARDONES, R. 2003. Estudio de la variabilidad y dependencia de cationes intercambiables y pH en un suelo Andisol de la provincia de Valdivia. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. 175p.
- McLEAN, E., HEDDDLESON, M., BARTLETT, R. y HOLOWAYCHUK, N. 1958. Aluminium in soils: I. Extraction methods and magnitudes in clays and Ohio soils. Ohio, USA. Soil Science Society Proceedings of America. 289-293.
- McLEAN, E., HEDDDLESON, M. y POST, G. 1959. Aluminium in soils: III. A comparison of extraction methods in soils clays. Soil Science Society of America Proceedings. 289-293.
- MATTE, F. 2000. Variabilidad y dependencia espacial del fósforo Olsen en un Andisol bajo dos sistemas de manejo. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. 103 p.
- OVALLES, F. 1991. Evaluación de la variabilidad de suelos a nivel de parcela, para el establecimiento en lotes experimentales en el estado de Cojedes. Agronomía Tropical 41 (1-2) 5-22. <http://www.redpav-fpolar.info.ve/agrotrop/v41_1-2/v411a10.html> (10 Diciembre, 2004).

- OVALLES, F y NUÑEZ, M. 1994. Métodos estadísticos para evaluar la variabilidad de suelos dentro de unidades de capacidad de uso en la depresión del lago Valencia. *Agronomía Tropical*. 44(1): 23-40. <http://www.redpav-fpolar.info.ve/agrotrop/v44_1.html> (10 Diciembre. 2004).
- OVALLE, F. y REY, J. 1995, Variabilidad interna de unidades de fertilidades suelos de la depresión del lago Valencia, *Agronomía Tropical*. 44(1):41-65.
< http://www.redpav-fpolar.info.ve/agrotrop/v44_1/v441a030.htm> (20 julio 2005)
- RADIC, S. 2001. Estudio de tolerancia a la toxicidad por aluminio de cuatro ecotipos de bromo (*Bromus valdivianus* Phil.). Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias .112 p
- RAY, R. 1958. Great soil groups in Chile and their relationship to natural land and water resource, FAO, The Ministry of Agriculture, Chile. 308 p.
- SADZAWKA A., GREZ R., MORA, M., SAAVEDRA N., CARRASCO M., R. y ROJAS C. 2000. Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. <<http://alerce.inia.cl/docs/presentaciones/Doc002ASR.pdf>> (10 Diciembre, 2004)
- SAINATO, C., ARRIGO, N., GIUFRE, L., SVIDOVSKI, B., ORDEN, S. y PALMA, M. 1996. Sistemas de labranza: análisis geoestadístico de las propiedades de un suelo. *Agricultura Técnica, Chile* 56(1):19-56.
- SOIL SURVEY STAFF, 1960. Soil Classification, a comprehensive system; 7 th approximation, Government Printing Office, Washington, D.C, U.S. 265 p.

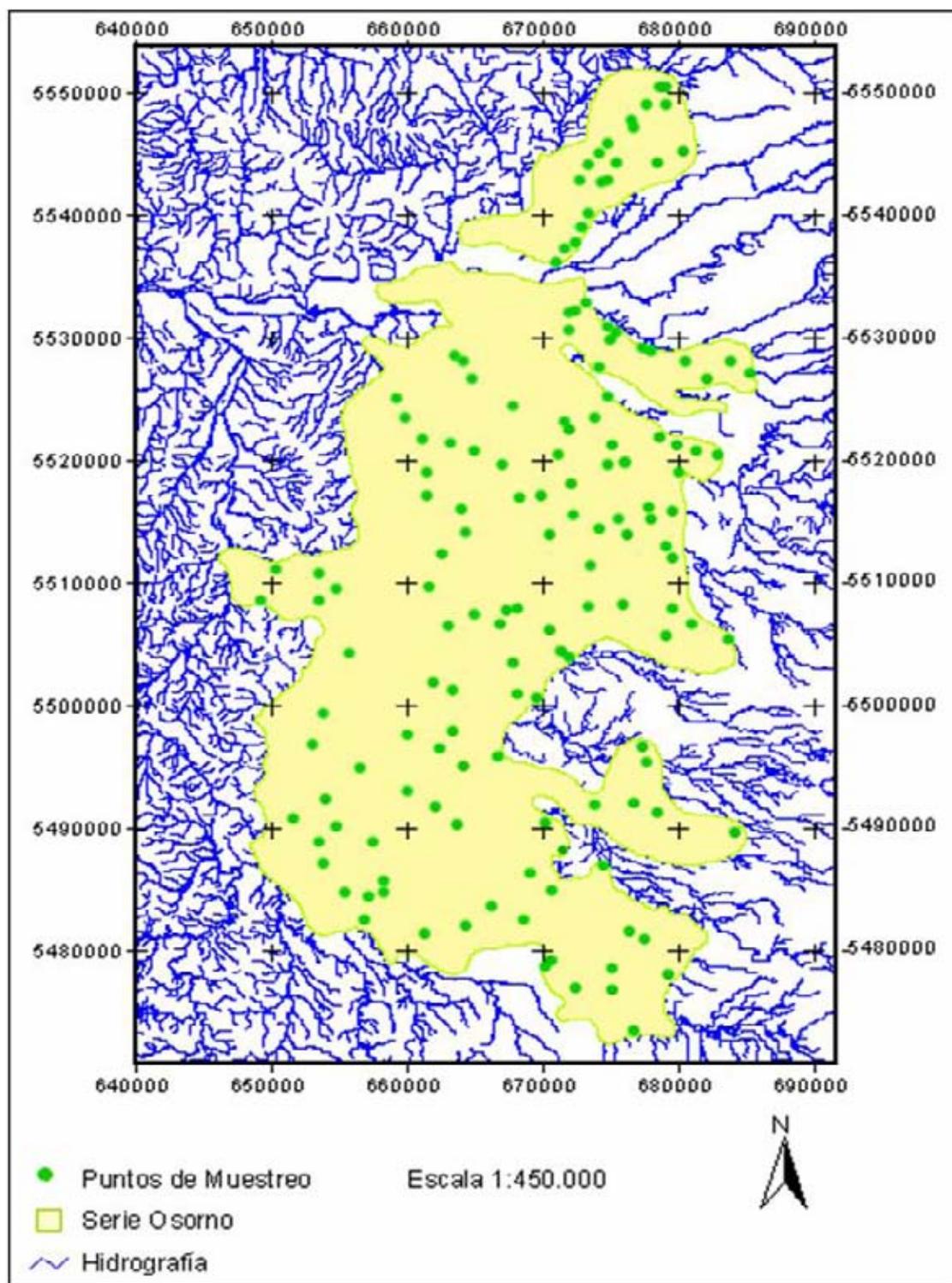
- SOIL SURVEY STAFF, 1975. Soil taxonomy, Soil Conservation service U.S. Department of Agriculture. 754p.
- SOIL SURVEY STAFF, 1990 Keys to Soil Taxonomy, Virginia Polytechnic Institute and State University. 422 p.
- SHOJI, S., NANZYO, M. y DAHLGREN, R. 1993. Volcanic ash soils, properties and utilization. Developments in soil science. Elsevier Science. Amsterdam, Nueva Zelanda. 288 p.
- TOSSO J. 1985. Suelos volcánicos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile. 723 p.
- TRANGMAR, B., YOST, R. y UEHARA, G. 1985. Application of geoestatistics to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy 38:45-92.
- ULLOA, G., VIDAL, M., INGARAMO, E. y PAZ, A., 2003. Aplicación de la geoestadística al estudio de las propiedades del suelo. Universidad del noroeste, <<http://www1.unne.edu.ar/cyt/2003/comunicaciones/05-Agrarias/A-031.pdf>> (10 Diciembre, 2004)
- URBINA, A. 1965. Relaciones entre algunas características físicas y químicas de suelos derivados de cenizas volcánicas. Agricultura Técnica, Chile 25 (1):9-1
- VERA, R., 2004. Estudio de la homogeneidad del aluminio extractable, de un Andisol de la X región de Chile, utilizando parámetros geoestadísticos. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias .79 p
- VIEIRA, S., NIELSEN, D. y BIGGAR, J. 1981. Spatial variability of field-measured infiltration rate. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 1040-1048.

WEBSTER, R y OLIVE, M 2001, Geostatistics for Environmental Scientists, John Wiley and Sons Ltd. Chichester, England. 271 p

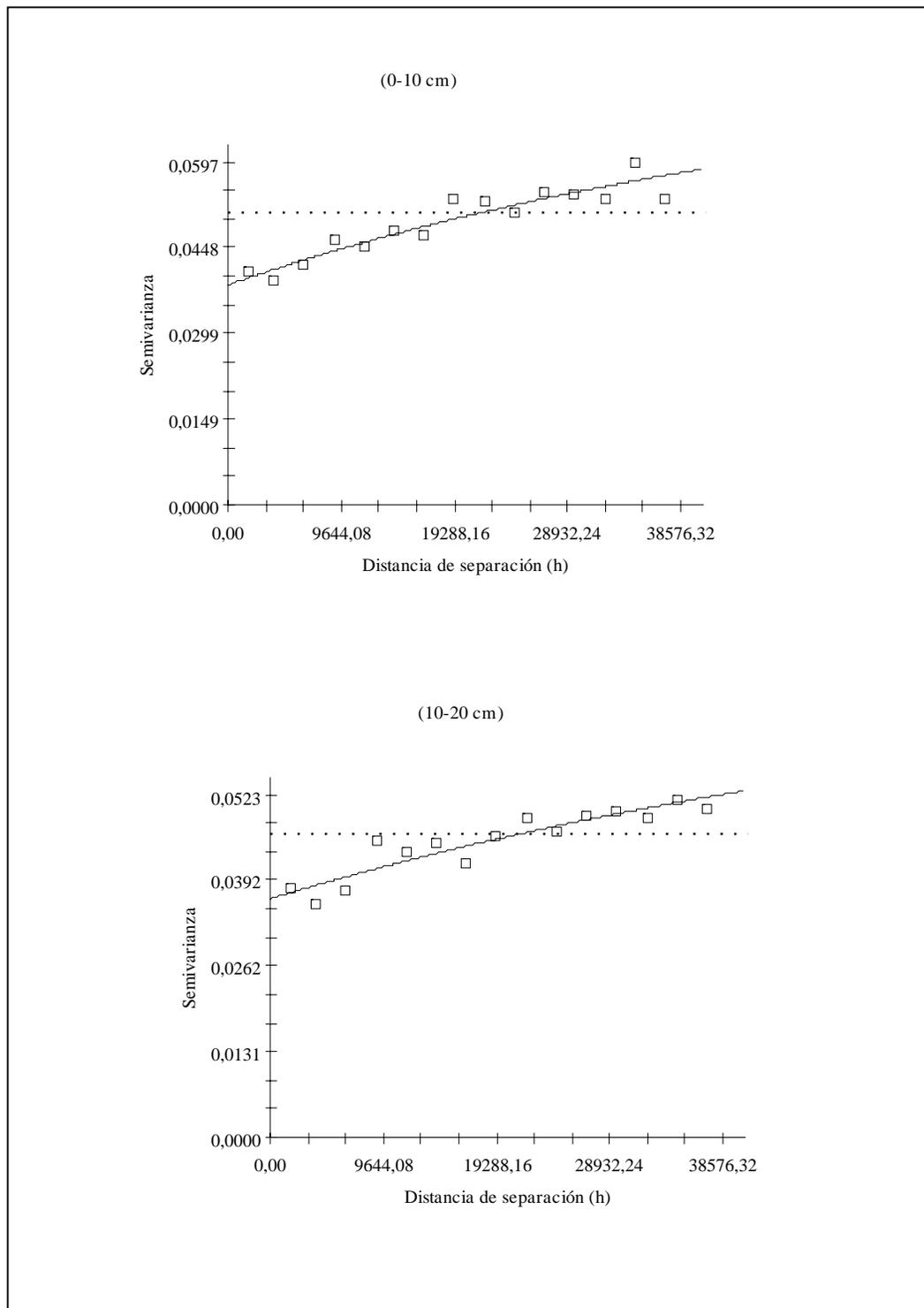
YOST, R., UEHARA, G. y FOX, R. 1982a. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas: I semivariograms. Soil Science Soc. Am. J. 46: 1028-1033.

ANEXOS

ANEXO 1 Mapa de distribución de los puntos muestreados dentro de la serie Osorno para las profundidades de 0-10 cm y de 10-20 cm.



**ANEXO 2 Semivariogramas isotrópicos para Al extractable en dos profundidades,
0-10 cm y 10-20 cm.**



ANEXO 3 Parámetros geoestadísticos para semivariograma isotrópico de Al extractable para dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm).

Parámetros	Profundidad (cm)	
	0-10	10-20
Modelo	Exponencial	Exponencial
D.A.R (m)	38.576,32	38.576,32
Co	0.038	0.036
Co + C	0.076	0.072
A	163.380	201.780
Co / (Co + C)	0.50	0.50
r ²	0.87	0.83