

## Variabilidad espacial de las propiedades físicas, químicas y biológicas de dos suelos agrícolas de la provincia de Quebec, Canadá

Spatial variability of the physical, chemical and biological properties in two agricultural soils in Quebec, Canada

M.T. Moreno Araujo

Departamento de Ingeniería, Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia, Ciudad Universitaria. Maracaibo, estado Zulia, Venezuela.

### Resumen

La distribución espacial de los parámetros físicos, químicos y biológicos de un suelo, afectan el rendimiento de los cultivos; sin embargo, la dependencia espacial de los parámetros biológicos del suelo ha sido poco explorada. Se realizó un estudio para establecer la influencia que sobre la fertilidad del suelo presentaron las variaciones espaciales de las propiedades físicas, químicas y biológicas de dos suelos agrícolas de la Provincia de Quebec (Canadá), pertenecientes al orden gleysol (frigid Aeric Haplaquept) de la serie Le Bras. Los suelos A, (con una fase franco-limosa, horizonte profundo franco arcilloso y drenaje imperfecto), y el suelo B, (con una fase ligera y gruesa, y pedregosidad) fueron muestreados en una red de 10x10m a 20 cm de profundidad, y a cada 10 cm hasta 40 cm de profundidad. Se determinaron los parámetros físicos, químicos y biológicos de ambos suelos. Los análisis geoestadísticos se realizaron con el programa GS+. La textura, la humedad del suelo y los cambios en los compuestos orgánicos afectaron la distribución espacial de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos evaluados. La variabilidad espacial del carbono orgánico, nitrógeno total y C/N aumentó significativamente con la profundidad en los dos suelos; en tanto que la densidad aparente mostró poca variación espacial.

**Palabras clave:** fertilidad de suelos, distribución espacial de las propiedades del suelo, geoestadística, variabilidad espacial.

## Abstract

A study in Quebec (Canada) was made to determine the effect on fertility soil by the spatial variability of physicals, chemicals and biological properties in two agricultural soils. The soils were classified as gleysol (frigid Aeric Haplaquept), serie Le Bras. Soil A has a loam-silty phase with a loam-clayey deep horizon and imperfect drainage. Soil B has a coarse phase and stony. Soils were sampled on a net of 10 x 10 m at 20 cm deep and each 10 cm until 40 cm deep. Physical, chemical and biological properties were determined. Geostatistics analyses were made with GS<sup>+</sup> software. Soil texture, moisture and organic compounds affected spatial variability of the physical, chemical and biological properties in both soils. Organic carbon, total nitrogen and C/N increased with depth in both soils, while bulk density showed a low spatial variability.

**Key words:** soil fertility, spatial distribution of the soil properties, geostatistic, spatial variability.

## Introducción

El aumento en la demanda mundial de alimentos ha elevado considerablemente la producción agrícola en las últimas décadas, requiriendo la utilización de variedades de cultivos con altos rendimientos y la aplicación de grandes cantidades de fertilizantes. Consecuentemente, la contaminación de suelos y aguas se ha incrementado en forma proporcional a la intensidad de la agricultura desarrollada. En la actualidad, el uso mundial de fertilizantes sobrepasa 195 millones de toneladas al año (FAO, 2008), lo cual origina residuos de nitratos ( $> 50 \text{ mg.L}^{-1}$ ) y fosfatos ( $> 0,1 \text{ mg.L}^{-1}$ ) en los acuíferos superiores a los límites permisibles, y da lugar a emisiones anuales a la atmósfera de 1400 kTon de dióxido de carbono, 749 kTon de metano y 81 kTon de óxido nitroso (Brethour *et al.*, 2006). Esto ha conllevado al desarrollo de prácticas agronómicas que logren altos rendimientos con el menor impacto ambiental, tales como la fertilización *sitio-específica*.

## Introduction

The increment in the worldwide demand of food has increased considerably the agriculture production in the last decades, requiring the use of crops with high performances and the application of huge quantities of fertilizers. Consequently, the contamination of soils and water has increased proportionally to the intensity of the developed agriculture. Nowadays, the worldwide use of fertilizers surpass the quantity of 195 millions of tons per year (FAO, 2008), which originates nitrates residues ( $> 50 \text{ mg.L}^{-1}$ ) and phosphate ( $> 0.1 \text{ mg.L}^{-1}$ ) in the superior aquifer of the permissible limits, resulting to annual emissions to the atmosphere of 1400 kTon of carbon dioxide, 749 kTon of methane and 81 kTon of nitrate oxide (Brethour *et al.*, 2006). This has carried to the development of agronomic practices that fulfill high performances with the least environmental impact, such as specific-in situ fertilization.

La fertilización sitio-específica implica la evaluación de las relaciones espaciales de las propiedades de un suelo y su efecto sobre el rendimiento de un cultivo. Se ha observado que la distribución espacial de los parámetros físicos, químicos y biológicos de un suelo, afectan el rendimiento de un cultivo (Machado *et al.*, 2002); sin embargo, la dependencia espacial de los parámetros biológicos del suelo ha sido poco explorada. El propósito de esta investigación fue estudiar la naturaleza de las relaciones espaciales de las características físicas, químicas y biológicas en dos suelos agrícolas y su influencia en la fertilidad de los mismos.

## Materiales y métodos

El estudio se realizó en una finca experimental en Saint-Lambert de Lauzon (Quebec), a 46°05' LN y 71°02' LO. La temperatura promedio anual es de 4°C con una precipitación promedio de 1126 mm.año<sup>-1</sup>. Se seleccionaron dos suelos gleysol (frigid Aeric Haplaquept), serie Le Bras; el suelo A con textura franco limosa y un horizonte profundo franco arcilloso con drenaje imperfecto, en tanto que el suelo B con una fase ligera y gruesa, y pedregosidad (Rompré, 1985). Se delimitaron dos parcelas experimentales de 4000 m<sup>2</sup>, con cada tipo de suelo respectivamente. Ambas parcelas venían de una rotación cebada-trébol. A inicios de primavera (período de deshielo), en cada parcela experimental se tomaron 40 muestras de suelo en una red de 10 x 10 m; unas muestras fueron recolectadas a 20 cm de profundidad, y otras muestras cada 10 cm has-

The specific-in situ fertilization implies the evaluation of spatial relations of the soil properties and its effect on the performance of a crop. It has been observed that the spatial distribution of physical, chemical and biological distribution of a soil, affect the crop's performance (Machado *et al.*, 2002); however, the spatial dependence of the biologic parameters of the soil has not been deeply developed. The aim of this research was to study the nature of the spatial relations of the chemical, physical and biological characteristics in two agriculture soils and their relations in the fertility of such soils.

## Materials and methods

The study was carried out at an Experimental Farm in Saint-Lambert de Lauzon (Quebec), at 46°05' NL and 71°02' WL. The annual average temperature is 4°C with an average precipitation of 1126 mm.year<sup>-1</sup>. Two gleysol (frigid Aeric Haplaquept) soils were selected, from the Le Bras series; soil A with a loam-silty texture and a deep loam-clayey horizon with an imperfect drainage, while soil B with a coarse phase and stony (Rompré, 1985). Two experimental plots of 4000m<sup>2</sup> were delimited for each type of soil respectively. Both plots came from a barley-clover rotation. At the beginning of the spring (thaw period), on each experimental plot were taken 40 samples of soil in a 10 x 10m, some samples were recollected at 20 cm of depth, and other samples every 10 cm until reaching a depth of 40 cm. Some parts of the samples were refrigerated at 4°C until performing a biological

ta 40 cm de profundidad. Una parte de las muestras se refrigeraron a 4°C hasta realizar los análisis biológicos: potencial de mineralización del nitrógeno por incubación del suelo en 14 días; respiración microbiana por evolución de CO<sub>2</sub>; actividad de la ureasa por incubación del suelo con úrea a 37°C y actividad de las fosfatasa s ácida y alcalina por incubación del suelo a 37°C y colorimetría. La otra parte de las muestras fueron secadas al aire y tamizadas (2 mm) para determinar las fracciones de arena, limo y arcilla por hidrometría, densidad aparente por cilindro Uhland, pH en suspensión 1:2; nitrógeno total por Kjeldahl; nitrógeno nítrico y amoniacal por digestión ácida con MgO y aleación de Devarda y destilación Kjeldahl; carbono orgánico por Walkley-Black, fósforo, potasio, calcio y magnesio disponibles por Mehlich III. A las muestras de suelo tomadas cada 10 cm de profundidad se les determinó densidad aparente, carbono orgánico y nitrógeno total. El coeficiente de variación y las estadísticas descriptivas fueron calculados con el programa estadístico SAS (SAS Institute Inc., 1991). Los análisis geoestadístico se realizaron con el programa GS<sup>+</sup> para Windows (Robertson, 2000).

## Resultados y discusión

En los dos suelos, las características físicas mostraron un coeficiente de variación más bajo (CV < 15%) que los observados para los parámetros químicos y biológicos (cuadro 1), lo cual coincidió con lo observado por Melchiori y Echeverría (2000), Sun *et al.* (2003) y Gho (2004). A pesar de las diferen-

analysis: mineralization potential of nitrogen by incubation of the soil within 14 days, microbial breathing by CO<sub>2</sub> evolution; urease activity by soil incubation with urea at 37°C and activity of the acid and alkaline phosphates of the soil at 37°C and colorimetric. The other part of the samples were let dried and sift (2 mm) to determine the fractions of sand, silt and clay by hydrometry, apparent density by Uhland cylinder, pH in suspension 1:2; total nitrogen and Kjeldahl; nitric and ammonia nitrogen by acid digestion with MgO and Devarda alloy and Kjeldahl distillation; organic carbon by Walkley-Black, phosphorous, potassium, calcium and magnesium available for Mehlich III. To the soil samples taken every 10 cm of depth, were determined the apparent density, organic carbon and total nitrogen. The variation coefficient and the descriptive statistical were calculated with the statistical program SAS (SAS Institute INC., 1991). The geostatistics analysis were done with GS<sup>+</sup> for Windows (Robertson, 2000).

## Results and discussion

In both soils, the physical characteristics showed a variation coefficient lower (CV < 15%) than the observed for the chemical and biological parameters (table 1), which agreed with the observed by Melchiori and Echeverría (2000), Sun *et al.* (2003) and Gho (2004). In spite of the granulometry differences, the texture fractions showed similar variation coefficients in both soils. The granulometric characteristics of each

**Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de las propiedades de los suelos de la serie Le Bras, fase franco-limosa (suelo A) y fase gruesa y ligera (suelo B), a una profundidad de 20 cm.**

**Table 1. Descriptive statistics of the soils properties of the Le Bras series, loam-silty phase (soil A), and coarse and stony phase (soil B) at 20 cm of depth.**

Variable	Suelo A			Suelo B		
	Promedio	Desv. Est.	C. V. (%)	Promedio	Desv. Est.	C. V. (%)
Respiración Microbiana (mg CO <sub>2</sub> · g <sup>-1</sup> ss)	0,10	0,04	43,00	0,23	0,07	28,89
Activ. Uréasa (µg N-NH <sub>4</sub> · g <sup>-1</sup> ss) <sup>1</sup>	33,75	6,33	18,79	45,00	8,68	19,28
Activ. Fosfatasa Ácida (µg P.N.P. · g <sup>-1</sup> ss) <sup>2</sup>	336,81	64,23	19,07	411,52	64,93	15,78
Activ. Fosfatasa Alcalina (µg P.N.P. · g <sup>-1</sup> ss)	170,35	34,03	19,97	101,71	19,57	19,24
PMN <sup>3</sup> (mg N-NO <sub>3</sub> · kg <sup>-1</sup> ss)	4,83	1,62	33,49	6,96	2,33	33,49
C.O. (%)	1,97	0,25	12,83	1,67	0,32	19,16
N total (%)	0,15	0,02	10,60	0,14	0,02	15,22
N-NO <sub>3</sub> (mg · kg <sup>-1</sup> ss)	9,11	2,44	26,84	5,69	2,37	41,74
N-NH <sub>4</sub> (mg · kg <sup>-1</sup> ss)	2,40	0,64	26,84	2,40	0,63	26,14
C/N	12,99	0,61	4,69	12,38	0,84	6,80
P Disp. (mg · kg <sup>-1</sup> ss)	47,54	10,78	22,68	23,69	8,59	36,27
K <sup>+</sup> (mg · kg <sup>-1</sup> ss)	127,96	25,51	19,94	80,10	26,61	33,21
Ca (mg · kg <sup>-1</sup> ss)	1098,36	141,72	12,90	1009,55	171,56	16,99

<sup>1</sup>Microgramos de nitrógeno amoniacal producido en 1 hora de incubación del suelo a 37°C.

<sup>2</sup>Microgramos de *para*-nitrofenol fosfato producido en 1 hora de incubación del suelo a 37°C.

<sup>3</sup>Potencial de Mineralización de Nitrógeno (t = 20 días).

**Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de las propiedades de los suelos de la serie Le Bras, fase franco-limosa (suelo A) y fase gruesa y ligera (suelo B), a una profundidad de 20 cm (continuación).**

**Table 1. Descriptive statistics of the soils properties of the Le Bras series, loam-silty phase (soil A), and coarse and stony phase (soil B) at 20 cm of depth (continuation).**

Variable	Suelo A			Suelo B		
	Promedio	Desv. Est.	C. V. (%)	Promedio	Desv. Est.	C. V. (%)
Mg (mg.kg <sup>-1</sup> ss)	55,18	6,54	11,85	87,76	14,17	16,15
K/(Ca + Mg) <sup>1/2</sup>	0,11	0,03	23,85	0,07	0,02	32,51
Ca/Mg	20,23	3,95	19,51	11,33	2,63	23,22
Da (g cm <sup>-3</sup> )	1,36	0,06	4,34	1,49	0,08	5,44
Arcilla (%)	20,15	1,54	7,66	18,57	3,01	16,23
Arena (%)	30,16	4,69	15,56	45,05	8,67	19,23
pH (1:2)	6,32	0,28	4,41	6,52	0,34	5,26

<sup>1</sup>Microgramos de nitrógeno amoniacal producido en 1 hora de incubación del suelo a 37°C.

<sup>2</sup>Microgramos de *para*-nitrofenol fosfato producido en 1 hora de incubación del suelo a 37°C.

<sup>3</sup>Potencial de Mineralización de Nitrógeno (t = 20 días).

cias en la granulometría, las fracciones texturales mostraron coeficientes de variación similares en ambos suelos. Las características granulométricas de cada suelo originaron variaciones importantes en el contenido de humedad de los mismos, y por ende, afectaron sus propiedades químicas y biológicas. De esta forma, las variaciones en la humedad de ambos suelos a inicios de la primavera y los procesos de inmovilización-mineralización del nitrógeno, fueron las causas de la alta variabilidad espacial mostrada por la actividad microbiana, el potencial de mineralización del nitrógeno y las formas inorgánicas del nitrógeno (Whitehead, 1995; Melchiori y Echeverría, 2000; Prasolova *et al.*, 2000).

Las texturas gruesas del suelo B favorecieron una actividad microbiana más uniforme (condición aeróbica), por lo que el coeficiente de variación de la respiración microbiana de este suelo fue inferior al del suelo A con texturas pesadas y drenaje imperfecto. La ausencia de cultivos y la poca actividad microbiana en la época de deshielo, originaron los bajos coeficientes de variación de la actividad enzimática en ambos suelos, ya que la ureasa y las fosfatasa fueron segregadas en cantidades importantes por las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo, respectivamente.

No hubo relación entre la alta variación del potencial de mineralización del nitrógeno y de la actividad microbiana con la baja variabilidad mostrada por los tipos de materiales orgánicos que sirvieron de sustrato en estos procesos biológicos

soil originated important variations in the humidity content of each, therefore, affected their chemical and biological properties. For this reason, the humidity variations in both soils at the beginning of spring and the immobilization-mineralization processes of nitrogen, were the causes of high spatial variability showed in the microbial activity, the mineralization potential of nitrogen and the inorganic ways of nitrogen nitrógeno (Whitehead, 1995; Melchiori y Echeverría, 2000; Prasolova *et al.*, 2000).

The thick textures of soil type B favored a more uniform microbial activity (aerobic condition), thus, the variation coefficient of the microbial breathing of this soil was inferior to soil type A, with heavy textures and imperfect drainage. The absence of crops and the reduced microbial activity during the ice age, originated the low variations of the enzymatic activity in both soils, since urease and phosphates were segregated in important quantities by the plants 'roots and the soil microorganisms, respectively.

There was not any relation between the high potential variation of nitrogen mineralization and the microbial activity, to the low variability showed by the types of organic materials that served as substrate in these biological processes, because the organic carbon, the total nitrogen and the C/N relation presented very low variation coefficients in both soils. Possibly, the total nitrogen, as well as the organic carbon were part of the steady fractions of the humidified organic matter;

pues el carbono orgánico, el nitrógeno total y la relación C/N presentaron coeficientes de variación muy bajos en ambos suelos. Posiblemente, el nitrógeno total al igual que el carbono orgánico formaron parte de las fracciones estables de la materia orgánica humificada; en tanto que la poca variación mostrada por la relación C/N, indicó que compuestos orgánicos de naturaleza similar estaban distribuidos en todo el suelo (restos vegetales de la rotación cebada – trébol). Resultados parecidos fueron reportados por Chevallier *et al.* (2000).

A diferencia del suelo A, el fósforo y el potasio disponible del suelo B mostraron altos coeficientes de variación. Delcourt *et al.* (1996) y Sun *et al.* (2003) también encontraron altos coeficientes de variación del fósforo y potasio disponibles en el suelo. La alta reactividad del fósforo con las distintas fracciones del suelo mineral causó elevada variabilidad en el espacio. Por otra parte, la textura gruesa del suelo B, favoreció el movimiento del potasio con el flujo de agua en el perfil, causando alta variación de este elemento en la capa arable. A pesar que el pH es un factor que influye la disponibilidad del fósforo del suelo, no hubo relación entre la alta variabilidad mostrada por este elemento y los bajos coeficientes de variación observados en el pH de ambos suelos.

La variabilidad espacial de la interacción Ca/Mg mostró independencia de las variaciones espaciales individuales del calcio y del magnesio, en los dos suelos estudiados; en cambio, el coeficiente de variación del potasio parece influir sobre la variabilidad mostrada por la interacción  $K/(Ca+Mg)^{1/2}$ .

therefore, the reduced variation showed by the C/N relation indicated that the similar organic compounds were distributed throughout the soil (vegetal residues of the barley-clover rotation). Similar results were reported by Chevallier *et al.* (2000).

Different to soil type A, phosphorous and potassium available in soil type B showed high variation coefficients. Delcourt *et al.* (1996) y Sun *et al.* (2003) also found high variation coefficients of phosphorous and potassium available in the soil. The high reactivity of phosphorous with different fractions of mineral soil caused an elevated variability in the space. On the other hand, the thick texture of soil type B, favored the potassium movement with the water drainage in the profile, causing a high variation of this element in the arable surface. Though pH is a factor that influences the phosphorous availability of the soils, there was not a reaction between the high variability showed by this element, and the low variation coefficients observed in the pH of both soils.

The spatial variability of the Ca/Mg interaction showed an Independence of the individual spatial variations of calcium and magnesium in both studied soils; instead, the variation coefficient of potassium seems to influence the variability showed the interaction  $K/(Ca+Mg)^{1/2}$ .

In both soils, an increment was observed in the spatial variability of organic carbon, total nitrogen and the C/N relation with the soil depth. The apparent density kept a less fluctuant distribution in the soil profile (table 2). It was observed an increment of the



En los dos suelos se observó un incremento en la variabilidad espacial del carbono orgánico, nitrógeno total y la relación C/N con la profundidad del suelo. La densidad aparente mantuvo una distribución menos fluctuante en el perfil del suelo (cuadro 2). Se observó un incremento de los coeficientes de variación a partir de los 20 cm de profundidad, lo cual indicó la presencia de compuestos orgánicos de naturaleza diferente. Los parámetros de ambos suelos mostraron una estructura espacial anisotrópica ajustada a una ecuación esférica, y en algunos casos, a un modelo exponencial (cuadros 3 y 4). En ambos suelos, tanto el fósforo como el calcio disponibles presentaron los más altos valores de efecto pepita, indicando un comportamiento aleatorio a cortas distancias. Jin y Jiang (2002) (6) explicaron que la estructura aleatoria a cortas distancias del fósforo era causado por su alta interacción con la fase sólida del suelo.

En el suelo B, el fósforo disponible presentó una mayor dependencia espacial (86%) y un efecto pepita más bajo que en el suelo A. Paralelamente, el pH, la densidad aparente y la fracción arcillosa mostraron un efecto pepita con valores cercanos a cero y una fuerte dependencia espacial (> 75%) en ambos suelos (figuras 1, 2 y 3).

El pH de ambos suelos mostró una estructura espacial moderada y un efecto pepita muy bajo. Los trabajos de Delcourt *et al.* (2000) reportaron una fuerte dependencia espacial del pH en suelos minerales. En los dos suelos, los rangos ( $A_0$ ) de dependencia espacial fueron muy amplios y muchas variables edáficas mostraron una estructura espacial dependiente de la

variación coeficientes after 20 cm of depth, which indicated the presence of organic compounds of different nature. The parameters of both soils showed a spatial anisotropic structure adjusted to a spherical equation, and in some cases, to an exponential model (tables 3 and 4). In both soils, the available phosphorous and calcium presented the highest values of seed effect, indicating a randomized behavior at short distances. Jin and Jiang (2002) (6) explained that the randomized structures at short distances of phosphorous was caused by its high interaction with the solid phase of the soil.

In soil type B, the available phosphorous presented a higher spatial dependence (86%) and a seed effect lower in soil type A. At the same time, pH, the apparent density and the clayey fraction showed a seed effect with values close to zero and a strong spatial dependence (> 75%) in both soils (figures 1, 2 and 3)

The pH in both soils showed a moderate spatial structure and a very low seed effect. Studies done by Delcourt *et al.* (2000) reported a strong spatial dependence of the pH in mineral soils. In both soils, the spatial dependence ranks ( $A_0$ ) were wide, and many edaphic variables showed a dependent spatial structure of the observations (anisotropy). In soil type A, the total nitrogen and the C/N relation kept their randomized behavior with the soil depth; thus, for the organic carbon was found a spatial structure described by a exponential equation at 20 cm of depth. The apparent density kept a spatial continuity with the spherical structure

**Cuadro 2. Variaciones en profundidad estadísticas descriptivas de las propiedades del suelo de la serie Le Bras, fase franco-limosa (suelo A) y fase gruesa y ligera (suelo B), hasta 40 cm de profundidad.**

**Table 2. Variations in descriptive statistical depth of the soil properties of soil from Le Bras series, loam-silty phase (soil A), coarse and stony phase (soil B), until 40 cm of depth.**

Variable	Profundidad (cm)	Suelo A			Suelo B		
		Media	Desv. Est.	C. V. (%)	Media	Desv. Est.	C. V. (%)
C.O. (%)	0-10	1,95	0,355	18,21	1,66	0,341	20,54
	10-20	2,06	0,196	9,51	1,63	0,309	18,96
	20-30	1,65	0,601	36,42	0,99	0,457	46,16
	30-40	0,76	0,400	52,63	0,78	0,339	43,46
N total (%)	0-10	0,154	0,015	9,74	0,134	0,024	17,91
	10-20	0,153	0,018	11,76	0,132	0,023	17,42
	20-30	0,126	0,028	22,22	0,064	0,029	45,31
	30-40	0,068	0,021	30,88	0,074	0,028	37,84
C/N	0-10	13,02	0,564	4,33	12,55	0,766	6,10
	10-20	13,00	0,899	6,92	11,87	0,874	7,36
	20-30	13,54	1,269	9,37	11,43	2,772	24,25
	30-40	11,45	2,577	22,51	11,16	2,222	19,91
Da (g.cm <sup>-3</sup> )	0-10	1,35	0,075	5,56	1,47	0,101	6,87
	10-20	1,38	0,059	4,28	1,49	0,062	4,16
	20-30	1,44	0,067	4,65	1,64	0,105	6,40
	30-40	1,60	0,149	9,31	1,69	0,096	5,68

**Cuadro 3. Parámetros de los semivariogramas anisotrópicos de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo de la serie Le Bras, fase franco-limosa (suelo A), a una profundidad de 20 cm.**

**Table 3. Parameters of the anisotropic semivariograms of the physical, chemical and biological properties of the soil Le Bras series, loam-silty (soil A) at 20 cm of depth.**

Propiedad	Modelo	Efecto Pepita (Co)	Meseta <sup>1</sup> (Co + C)	Rango <sup>2</sup> (Ao)	Proporción <sup>3</sup> C/(Co+C)	R <sup>2</sup>
Mg (mg.kg <sup>-1</sup> ss)	Exponencial	14,000	48,920	12,900	0,714	0,833
Ca (mg.kg <sup>-1</sup> ss)	Esférico	5750,000	21830,000	44,000	0,737	0,958
Ca/Mg	Esférico	0,130	17,350	33,900	0,993	0,836
P (mg.kg <sup>-1</sup> ss)	Esférico	58,500	217,600	148,100	0,731	0,911
pH	Esférico	0,023	0,090	44,700	0,744	0,934
Arcilla (%)	Esférico	0,001	3,020	47,300	1,000	0,905
Da (g.cm <sup>-3</sup> )	Esférico	0,010	0,010	189,100	0,855	0,803

<sup>1</sup>Umbral de semivarianza donde existe dependencia espacial (C), y en ocasiones, comportamiento aleatorio de la variable (Co).

<sup>2</sup>Distancia de dependencial espacial, en metros.

<sup>3</sup>Proporción de dependencia espacial (C) del total de la estructura aleatoria (Co) más la regionalizada (C) de la variable.

Cuadro 4. Parámetros de los semivariogramas anisotrópicos de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B), a una profundidad de 20 cm.

Table 4. Parameters of the anisotropic semivariograms of the physical, chemical and biological properties of the soil Le Bras, coarse and stony phase (soil B), at 20 cm of depth.

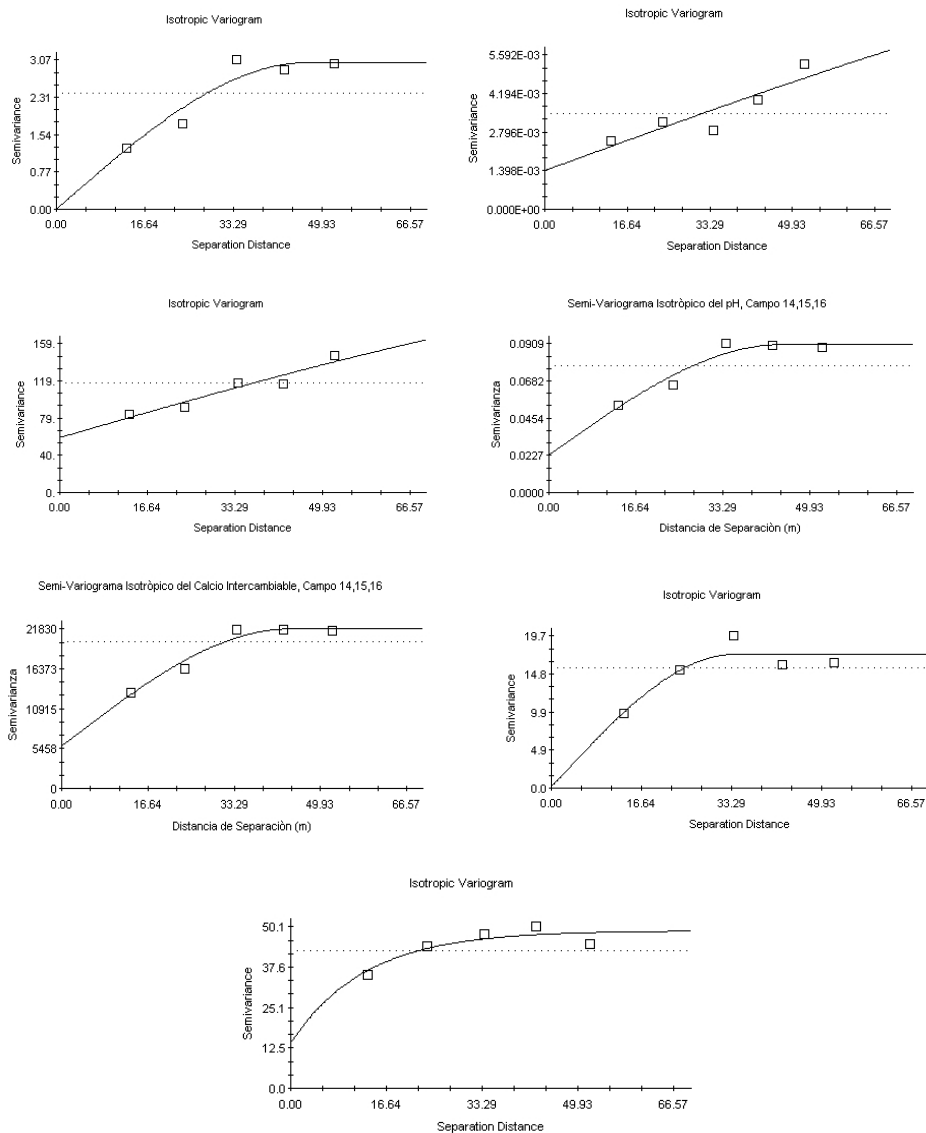
Propiedad	Modelo	Efecto Pepita (Co)	Meseta <sup>1</sup> (Co + C)	Rango <sup>2</sup> (Ao)	Proporción <sup>3</sup> C/(Co+C)	R <sup>2</sup>
Resp. Microbiana (mg CO <sub>2</sub> , g <sup>-1</sup> ss)	Exponencial	0,002	0,010	144,500	0,783	0,886
Activ. Uréasa (µg N-NH <sub>4</sub> , g <sup>-1</sup> ss)	Esférico	25,800	170,300	138,800	0,849	0,975
Activ. Fosfatasa Ácida (µg P.N.P. g <sup>-1</sup> ss)	Esférico	1590,000	4763,000	40,600	0,666	0,977
Activ. Fosfatasa Alcalina (µg P.N.P. g <sup>-1</sup> ss)	Esférico	1,000	459,300	46,300	0,998	0,933
PMN <sup>4</sup> (mg N-NO <sub>3</sub> , kg <sup>-1</sup> ss)	Esférico	0,830	7,125	55,100	0,884	0,973
C.O. (%)	Esférico	0,000	0,138	49,100	0,999	0,972
N total (%)	Esférico	0,000	0,000	37,400	0,998	0,969
N-NO <sub>3</sub> (mg, kg <sup>-1</sup> ss)	Exponencial	3,720	8,996	132,500	0,586	0,885
C/N	Esférico	0,226	1,031	64,900	0,781	0,983
P Disp. (mg, kg <sup>-1</sup> ss)	Esférico	11,400	83,750	32,000	0,864	0,958
K (mg, kg <sup>-1</sup> ss)	Esférico	370,000	1250,900	143,200	0,704	0,987
Ca (mg, kg <sup>-1</sup> ss)	Esférico	22550,000	45110,000	146,600	0,500	0,873
K/(Ca + Mg) <sup>1/2</sup>	Esférico	0,000	0,001	198,200	0,773	0,805
Da (g, cm <sup>-3</sup> )	Esférico	0,001	0,008	52,700	0,840	0,974
Arcilla (%)	Esférico	0,940	9,810	30,900	0,904	0,936
pH (1:2)	Esférico	0,069	0,192	134,600	0,640	0,856

<sup>1</sup>Umbral de semivarianza donde existe dependencia espacial (C), y en ocasiones, comportamiento aleatorio de la variable (Co).

<sup>2</sup>Distancia de dependencia espacial, en metros.

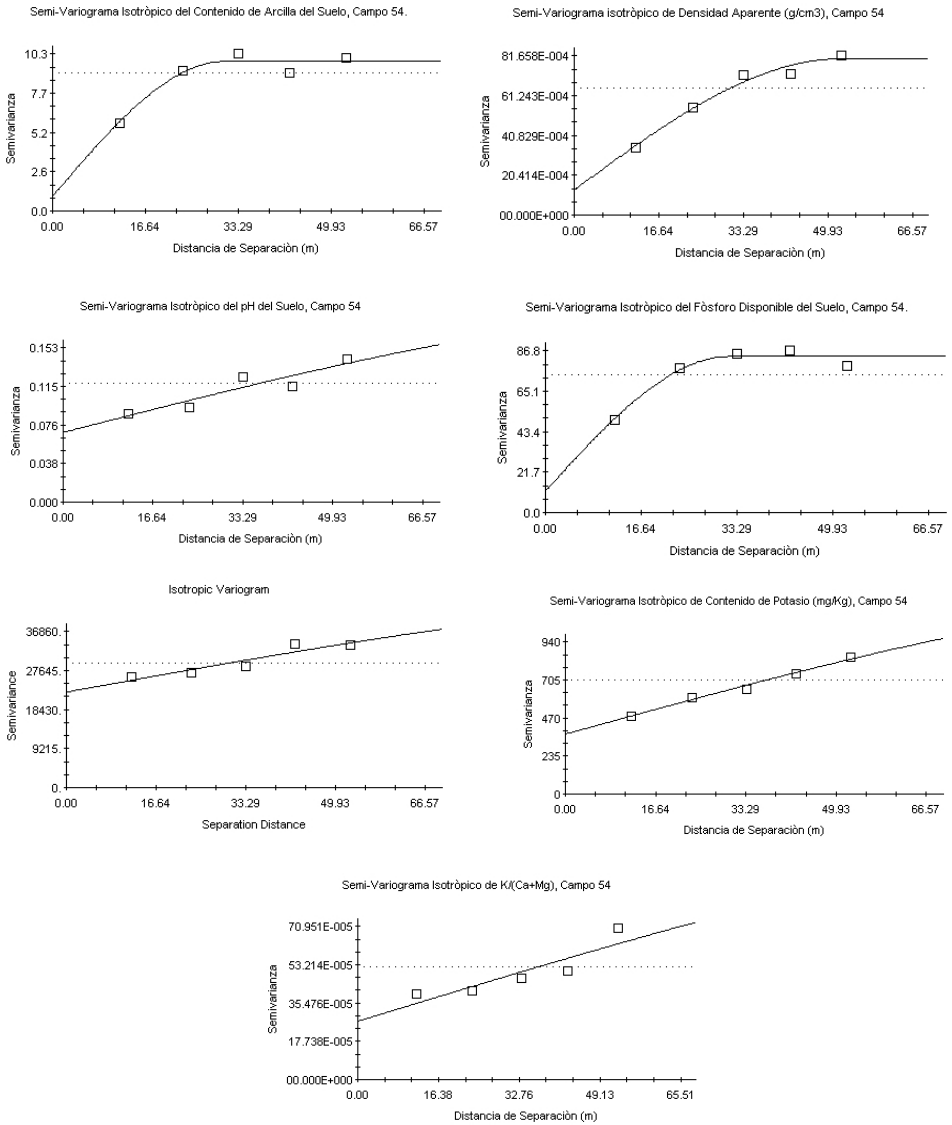
<sup>3</sup>Proporción de dependencia espacial (C) del total de la estructura aleatoria (Co) más la regionalizada (C) de la variable.

<sup>4</sup>PMN = Potencial de Mineralización del Nitrógeno lábil (t = 20 días).



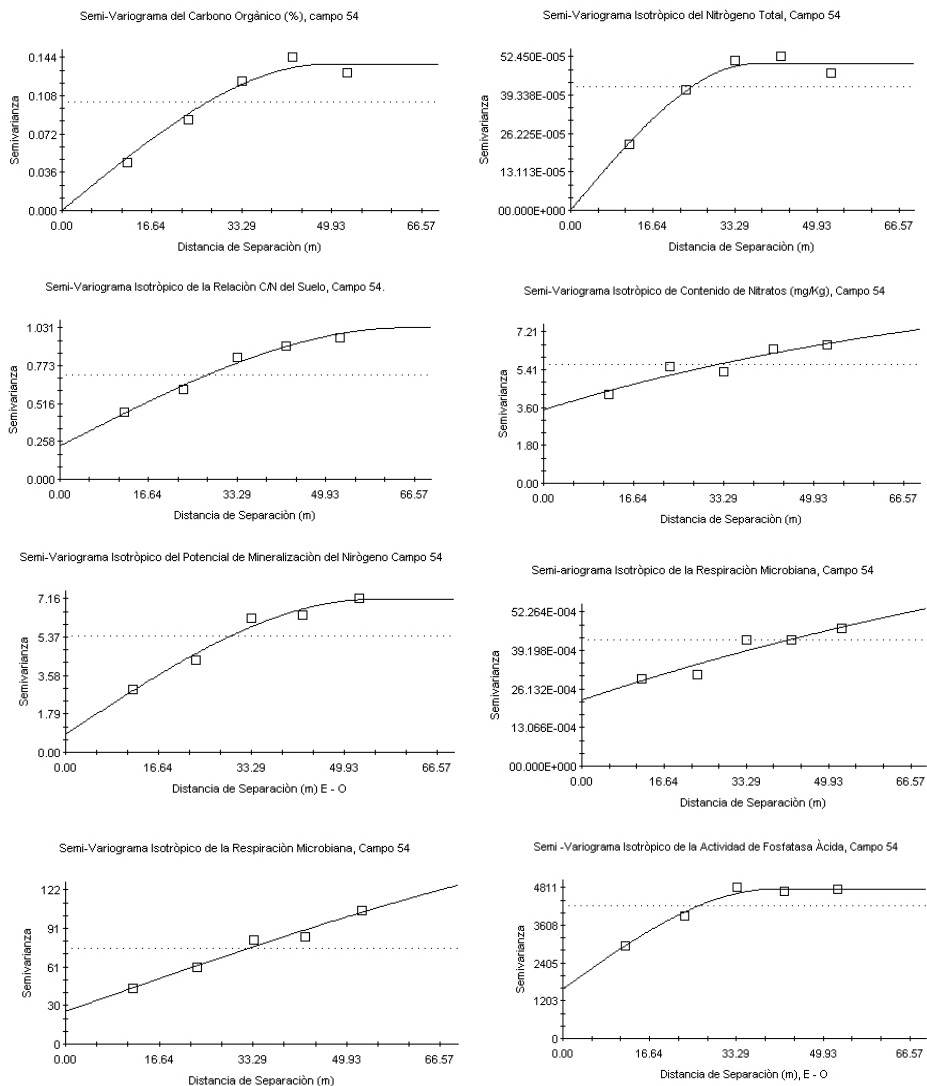
**Figura 1. Semivariogramas omnidireccionales de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo de la serie Le Bras, fase franco-limoso (suelo A), a una profundidad de 20 cm.**

**Figure 1. Omnidirectional semivariograms of the physical, chemical and biological properties of the soil Le Bras series, loam-silty phase (soil A) at 20 cm of depth.**



**Figura 2. Semivariogramas omnidireccionales de las propiedades físicas y químicas del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B), a una profundidad de 20 cm.**

**Figure 2. Omnidirectional semivariograms of the physical and chemical properties of the soil Le Bras series, coarse and stony phase (soil B), at 20 cm of depth.**



**Figura 3. Semivariogramas omnidireccionales de las propiedades químicas y biológicas del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B), a una profundidad de 20 cm.**

**Figure 3. Omnidirectional semivariograms of the chemical and biological properties of the soil Le Bras series, coarse and stony phase (soil B), at 20 cm of depth.**

dirección de las observaciones (anisotropía). En el suelo A, el nitrógeno total y la relación C/N mantuvieron su comportamiento aleatorio con la profundidad del suelo; en tanto que para el carbono orgánico se encontró una estructura espacial descrita por una ecuación exponencial a partir de los 20 cm de profundidad. La densidad aparente mantuvo una continuidad espacial con estructura esférica hasta los 20 cm de profundidad; a partir de esta profundidad tuvo un comportamiento aleatorio. En el suelo B, la dependencia espacial del nitrógeno total, carbono orgánico, la relación C/N y la densidad aparente a distintas profundidades fueron descritas por modelos esféricos y exponenciales. En este suelo, entre 20 - 30 cm de profundidad, hubo ausencia de dependencia espacial para estas variables, la cual coincidió con un incremento significativo del coeficiente de variación.

## Conclusiones

La granulometría del suelo, el contenido de humedad, los procesos de mineralización -inmovilización y los cambios en la naturaleza de los compuestos orgánicos afectaron los patrones de distribución espacial de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos estudiados.

Las propiedades físicas mostraron coeficientes de variación más bajos que las propiedades químicas y biológicas en ambos suelos, indicando que los parámetros bioquímicos presentaron una dinámica muy compleja; en tanto que las características físicas de los suelos generalmente mostraron una distribución más uniforme.

until 20 cm of depth; after this depth, there was a randomized behavior. In soil type B, the spatial dependence of the total nitrogen, organic carbon, the C/N relation and the apparent density at different depths were described by spherical and exponential models. In this soil, there was an absence of spatial dependence for these variables from 20 - 30 cm of depth, which agreed with a significant increment of the variation coefficient.

## Conclusions

The soil granulometry, the humidity content the mineralization-immobilization processes and the nature changes of the organic compounds affected the spatial distribution patterns of the physical, chemical and biological properties of the studied soils.

The physical properties showed lower variation coefficients than the chemical and biological properties in both soils, indicating that the biochemical parameters presented a complex dynamic; therefore, the physical characteristics of soils generally showed a more uniform distribution.

The organic carbon, total nitrogen and C/N relation of both soils kept a low spatial variation due to their relation to the stable fractions of the organic matter of soil (humidified).

The variability in the space of organic carbon, total nitrogen, and C/N relation increased significantly with the depth in both of the studied soils, thus, the apparent density showed a reduced spatial variation.

The randomized behavior at short



El carbono orgánico, nitrógeno total y la relación C/N de ambos suelos tuvieron una baja variación espacial debido a su relación con las fracciones estables de la materia orgánica del suelo (humificación).

La variabilidad en el espacio del carbono orgánico, nitrógeno total y la relación C/N aumentó significativamente con la profundidad en los dos suelos estudiados, en tanto que la densidad aparente mostró poca variación espacial.

El comportamiento aleatorio a cortas distancias (efecto pepita) observado para el fósforo disponible, la actividad enzimática, los nitratos y las bases intercambiables en los dos suelos, podría ser causado por las variaciones de la humedad del suelo, los procesos de mineralización-inmovilización del nitrógeno, la reactividad del fósforo con la fase sólida del suelo, entre otras causas.

La variabilidad espacial de la interacción entre las bases intercambiables,  $K/(Ca+Mg)$ , fue más elevada que aquella de cada elemento en forma individual, observándose una independencia en el comportamiento espacial de las bases intercambiables y sus interacciones.

Los resultados demostraron que las concentraciones de los nutrientes y los procesos biológicos que afectaron su disponibilidad en un suelo no tuvieron una distribución espacial uniforme, por lo cual las aplicaciones de fertilizantes en el terreno cultivado deben ajustarse a estas variaciones (fertilización sitio-específica).

distances (seed effect) observed for the available phosphorous, the enzymatic activity, nitrates and the interchangeable bases in both soils may be caused by the variations of the soil's humidity, the mineralization-immobilization processes of nitrogen, the reactivity of phosphorus with a solid phase of the soil, among other causes.

The spatial variability of the interaction among the interchangeable bases,  $K/(Ca+Mg)$ , was higher than the one of each individual element, observing an independence in the spatial behavior of the interchangeable bases and their interactions.

The results showed that the nutrients concentrations and the biological processes that affected their availability in the soil did not have an uniform spatial distribution, therefore, the application of fertilizers in the cropped land must be adjusted to these variations (specific-in situ fertilization).

## Acknowledgments

The author wants to thanks the "Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)", which installations, treatment and professionalism of the personnel made of this research possible.

*End of english version*

---

## Agradecimientos

El autor extiende su agradecimiento al Instituto de Investigaciones y Desarrollo Agroambiental de Quebec (IRDA), cuyas instalaciones y la buena disposición y profesionalismo de su personal hicieron posible la realización de este trabajo.

## Literatura citada

- Brethour, Ch., T. Moore y D. Bucknell. 2006. Évaluation des incidences environnementales et économiques des règlements environnementaux pour le secteur agricole. Une étude de cas sur l'élevage de porcins. Agriculture et Agroalimentaire Canada. George Morris Centre. 179 p. Disponible en: [http://www4.agr.gc.ca/resources/prod/doc/pol/pub/hog-porc/pdf/hog-porc\\_f.pdf](http://www4.agr.gc.ca/resources/prod/doc/pol/pub/hog-porc/pdf/hog-porc_f.pdf)
- Chevallier, T., M. Voltz, E. Blanchart, J.L. Chotte, V. Eschenbrenner, M. Mahieu y A. Albrecht. 2000. Spatial and temporal changes of soil C after establishment of a pasture on a long-term cultivated vertisol Martinique. Geoderma 94:43-58.
- Delcourt, H., P.L. Darius, y J. De Baerdemaeker. 1996. The spatial variability of some aspects of topsoil fertility in two Belgian fields. Computers and Electronics in Agriculture 14:179-196.
- FAO, 2008. Current world fertilizer trends and outlook to 2011/12. Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome. 57 p. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/cwftol1.pdf>
- Gho B., C. 2004. Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo y su relación con los rendimientos de maíz (*Zea mays* L.). Monografía. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Departamento de Ciencias Vegetales. Disponible en: [http://www.uc.cl/agronomia/e\\_publicaciones/Articulos/articulos.htm](http://www.uc.cl/agronomia/e_publicaciones/Articulos/articulos.htm)
- Jin J. y Ch. Jiang. 2002. Spatial variability of soil nutrients and site-specific nutrient management in the P.R. China. Computers and Electronics in Agriculture 36:165-172.
- Machado, S., E.D. Jr. Bynum, T. Archer, R. Lascano, J. Bordovsky, K. Bronson, D. Nesmith, E. Segarra, D. Rosenow, G. Peterson, W. Xu, y L. Wilson. 2002. Spatial and temporal variability of sorghum and corn yield: interactions of biotic and abiotic factors. Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July. American Society of Agronomy; Madison, USA.
- Melchiori, R.J. y H. Echeverría. 2000. Variabilidad espacial en algunas propiedades del suelo: I. Asociación con las variaciones en el rendimiento del trigo. Disponible en: <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/mansit.htm>
- Moulin, A., D. Derksen, D. McLaren, y C. Grant. 2002. Spatial variability of soil fertility and identification of management zones on hummocky terrain. Brandon Research Centre, Agriculture and Agri-Food Canada, Brandon. 3rd. Annual Manitoba Agronomists Conference, 2002 December 10-11, 2002.
- Paz-Gonzalez, A., S.R. Vieira, y M.T. Taboada C. 2000. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. Geoderma 97:273-292.
- Prasolova, N.V., Z.H. Xub, P.G. Safagnaa, y M.J. Dieters. 2000. Spatial-temporal variability of soil moisture, nitrogen availability indices and other chemical properties in hoop pine (*Araucaria cunninghamii*) plantations of subtropical Australia. Forest Ecology and Management 136:1-10.
- Robertson, G. 2000. Geostatistics for the environmental science. GS+ for windows v. 5.1, Gamma Design Software.
- Rompré, M. 1985. Cartographie des sols de la station de recherche de Saint-Lambert Lévis. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de

l'Alimentation du Québec. Disponible en: <http://www.mapaq.gouv.qc.ca>.

SAS Institute Inc. 1991. SAS/STAT. User's guide. Version 6.03. Fourth edition, vol. 1. Cary, NC, SAS Institute Inc.

Sun, B., S. Zhou, y Q. Zhao. 2003. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical

analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma* 115:85-99.

Whitehead, D.C. 1995. Grassland nitrogen. CAB International, Wallingford, UK. 397 p.