

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**VARIABILIDAD ESPACIAL EN LA DISPONIBILIDAD DE FORRAJE Y
ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO**

por

**Valentina BONOMO FRANCO
Felipe RODRÍGUEZ COSTA**

**TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2020**

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. (PhD.) Walter Ayala

Ing. Agr. (PhD.) José A. Terra

Ing. Agr. (PhD.) Pablo Boggiano

Fecha: 02 de junio de 2020

Autores:

Valentina Bonomo Franco

Felipe Rodríguez Costa

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiéramos agradecer al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) por brindarnos la posibilidad de realizar este trabajo de tesis, así como a la Facultad de Agronomía, UdelaR por aportarnos todos los conocimientos necesarios para nuestra formación como profesionales.

Al Ing. Agr. PhD. Walter Ayala quien fue nuestro tutor, por contribuir en nuestra formación como profesionales y personas. Agradeciendo su apoyo y direccionamiento, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A todo el equipo del departamento de pasturas de INIA Treinta y Tres por su disposición y colaboración en los trabajos de campo y laboratorio. A la Lic. en Bibliotecología Belky Mesones y al Ing. Agr. Mg. Martin Claramunt por sus valiosos aportes a este trabajo.

Finalmente, a nuestros familiares y amigos por el apoyo incondicional durante este tiempo.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. OBJETIVO GENERAL	1
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. VARIABILIDAD ESPACIAL.....	3
2.1.1. <u>Aplicación de la geostatística en el análisis de la variabilidad espacial</u>	4
2.1.1.1. Descripción del semivariograma	4
2.1.1.2. Interpolación mediante kriging	6
2.2. VARIABILIDAD ESPACIAL EN LA BIOMASA DISPONIBLE	7
2.3. VARIABILIDAD ESPACIAL EN ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO	8
2.3.1. <u>Variabilidad espacial en el contenido de carbono orgánico del suelo</u>	9
2.3.2. <u>Variabilidad espacial en el contenido de nitrógeno</u>	9
2.3.3. <u>Variabilidad espacial en el contenido de fósforo</u>	10
2.3.4. <u>Variabilidad espacial en el contenido de potasio</u>	10
2.3.5. <u>Variabilidad espacial en el contenido de calcio y magnesio</u>	11
2.3.6. <u>Variabilidad espacial en la capacidad de intercambio catiónico</u>	12
2.3.7. <u>Variabilidad espacial en el pH del suelo</u>	12
2.3.8. <u>Variabilidad espacial en la conductividad eléctrica aparente del suelo</u>	13
2.4. EL PROCESO DE PASTOREO Y SU DISTRIBUCIÓN ESPACIAL.....	14
2.5. AGRICULTURA DE PRECISIÓN	16
2.5.1. <u>Tecnologías disponibles asociadas a la agricultura de precisión</u>	17
2.5.1.1. Mediciones de la CEa a través del sensor VERIS 3100®	17
2.5.1.2. Mediciones del NVDI a través del sensor GreenSeeker™	19

2.5.1.3. Monitoreo remoto de animales a través del sensor MOONITOR®	21
2.6. SÍNTESIS	22
2.7. HIPÓTESIS	22
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	24
3.1. LOCALIZACIÓN, CARACTERIZACIÓN EDÁFICA Y PERÍODO EXPERIMENTAL	24
3.2. ANTECEDENTES	24
3.3. CONDICIONES CLIMÁTICAS PREVIAS Y DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO	25
3.4. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	25
3.4.1. <u>Diseño de la grilla de muestreo</u>	25
3.4.2. <u>Caracterización del lote de animales y estrategia de pastoreo</u>	27
3.5. DETERMINACIONES	27
3.5.1. <u>Determinaciones sobre la pastura</u>	27
3.5.1.1. Altura, cantidad de forraje y composición botánica	27
3.5.1.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	27
3.5.1.3. Calidad de la biomasa disponible	27
3.5.2. <u>Determinaciones sobre el suelo</u>	28
3.5.3. <u>Determinaciones sobre los animales</u>	28
3.6. ANÁLISIS DE DATOS	29
3.6.1. <u>Análisis exploratorio de los datos</u>	29
3.6.1.1. Análisis estadístico descriptivo.....	29
3.6.1.2. Análisis de correlación de Pearson	29
3.6.1.3. Análisis de igualdad de varianza (ANAVA)	29
3.6.2. <u>Análisis de la estructura espacial y predicción mediante kriging</u>	30
3.6.3. <u>Análisis espacial de la actividad de pastoreo</u>	30
4. <u>RESULTADOS</u>	32
4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	32
4.2. RESULTADOS SOBRE LA PASTURA.....	33

4.2.1. <u>Estadística descriptiva y análisis de correlación lineal para los atributos medidos sobre la pastura</u>	33
4.2.2. <u>Comparación de medias y CV</u>	37
4.2.3. <u>Análisis de estructura espacial y predicción mediante kriging de la BDf.</u> ..	37
4.3. <u>RESULTADOS SOBRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO</u>	39
4.3.1. <u>Estadística descriptiva para los atributos medidos sobre el suelo</u>	39
4.3.2. <u>Resultados del análisis de correlación de Pearson entre propiedades del suelo</u>	41
4.3.3. <u>Comparación de medias y CV para las variables correlacionadas significativamente con BDf</u>	44
4.3.4. <u>Análisis de estructura espacial y predicción mediante kriging</u>	48
4.4. <u>RESULTADOS SOBRE EL PASTOREO ANIMAL</u>	53
4.4.1. <u>Variabilidad de la masa de forraje pre y post pastoreo</u>	54
5. <u>DISCUSIÓN</u>	55
6. <u>CONCLUSIONES</u>	63
7. <u>RESUMEN</u>	64
8. <u>SUMMARY</u>	66
9. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	68
10. <u>ANEXOS</u>	86

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Resultados de CV y dependencia espacial para el contenido de COS.....	9
2. Resultados de CV y dependencia espacial para el contenido de nitrógeno	10
3. Resultados de CV y dependencia espacial para el contenido de fósforo	10
4. Resultados de CV y dependencia espacial para el contenido de potasio	11
5. Resultados de CV y dependencia espacial para el contenido de Ca y Mg.....	12
6. Resultados de CV y dependencia espacial para la CIC.....	12
7. Resultados de CV y dependencia espacial para pH	13
8. Resultados de CV y dependencia espacial para la CEa a 30 cm de profundidad	13
9. Características edáficas en los primeros 15 cm del suelo para la UEPP.....	24
10. Estadísticos descriptivos asociados a cada variable medida sobre la pastura pre y post pastoreo	33
11. Modelo de autocorrelación espacial ajustado y sus componentes para la BDf.....	38
12. Validación cruzada para el modelo de semivariograma ajustado para BDf	38
13. Estadísticos descriptivos asociados a cada variable medida sobre el suelo	40
14. Análisis de correlación de Pearson entre las propiedades físico-químicas del suelo	43
15. Modelos de autocorrelación espacial ajustados y sus componentes para las variables de suelo correlacionadas con las BDf	48
16. Validación cruzada para los modelos de semivariograma ajustados para las variables de suelo correlacionadas con las BDf	51
17. Concentración de PC, FDN, FDA y cenizas en función de la BDf	54
18. Variabilidad en términos de CV para la BDf y la BRf según parcela.....	54

Figura No.

1. Representación gráfica de un semivariograma teórico y sus partes constituyentes.....	6
2. Representación esquemática del sensor VERIS 3100®	18
3. Sensor remoto GreenSeeker™	20
4. Collares MOONITOR®	22
5. Diseño de la grilla de muestreo	26
6. Dirección de la toma de muestras de forraje y suelo	26
7. Dirección de unión de las muestras de forraje para evaluar calidad	28
8. Condiciones climáticas previo y durante el período de estudio	32
9. Correlación de Pearson entre la materia seca pre y post pastoreo	34
10. Matriz de correlación de Pearson entre las variables de la biomasa disponible	35
11. Matriz de correlación de Pearson entre las variables de la biomasa remanente	36
12. Gráfico box plot para biomasa disponible de festuca según parcela	37
13. Semivariograma experimental y teórico para la Bdf.....	38
14. Kriging de la Bdf.....	39
15. Gráficos de dispersión entre Bdf y propiedades del suelo con su coeficiente de correlación	44
16. Gráfico box plot para CO total según parcela.....	45
17. Gráfico box plot para N total según parcela.....	45
18. Gráfico box plot para Ca según parcela	46
19. Gráfico box plot para Mg según parcela	46
20. Gráfico box plot para BT según parcela	47
21. Gráfico box plot para A titulable según parcela.....	47
22. Gráfico box plot para CIC pH ₇ según parcela.....	48
23. Semivariograma de las variables correlacionadas significativamente con la Bdf	50
24. Kriging de las distintas variables correlacionadas significativamente con la Bdf	52
25. Gráfico box plot de frecuencia de visita de pastoreo según categoría para las UM de las parcelas 1, 4, 5 y 8.....	53
26. Gráfico box plot de frecuencia de visita de pastoreo según categoría para	

las UM de las parcelas 2, 3 y 6.....	53
27. Mapas de burbuja de BDf y las distintas variables correlacionadas significativamente con ésta	60
28. Distribución espacial de la BDf asociado a las curvas topográficas cada 0,5 m	61

1. INTRODUCCIÓN

En países como Uruguay, donde la ganadería se desarrolla mayormente sobre sistemas pastoriles es frecuente la presencia de variabilidad espacial en atributos de la pastura, del suelo, así como en la distribución de los animales en pastoreo.

El adecuado uso de los distintos recursos forrajeros es clave en la sustentabilidad ambiental, física y económica de las empresas y por lo tanto en la competitividad del sector ganadero. En este contexto, la presupuestación forrajera es una herramienta fundamental en la planificación de cualquier establecimiento ganadero o agrícola-ganadero, en donde las mediciones de disponibilidad de materia seca (MS) son esenciales para determinar aspectos relevantes del sistema como la carga, la ganancia animal, la productividad de las pasturas, y para evaluar distintas estrategias de manejo (Mannetje, 2000).

Sin embargo, lo habitual es determinar la cantidad promedio de forraje disponible por unidad de superficie, sin considerar que la biomasa presenta variabilidad en el espacio, asumiendo que el valor medio observado es el esperado en todos los puntos del campo o parcela.

Por lo tanto cuantificar, analizar y mapear la distribución de la biomasa disponible, así como los factores que la afectan permitiría contar con información precisa y objetiva al momento de presupuestar la cantidad de forraje disponible para la alimentación del ganado.

Existen herramientas que permiten obtener y procesar cantidades importantes de información georreferenciada, además de nuevas técnicas que incorporan al análisis los patrones geográficos de los datos para explicar su variabilidad espacial.

Los sistemas de posicionamiento global por satélite (GPS), los sistemas de información geográfica (SIG), programas de computación y diversos tipos de sensores remotos equipados con GPS constituyen las herramientas tecnológicas de agricultura de precisión (AP). Estas herramientas y nuevas técnicas de análisis geoestadístico se han utilizado principalmente en la producción agrícola, (ejemplo, aplicación variable de insumos en cultivos extensivos en relación a la variabilidad espacial de propiedades del suelo), aunque en mucho menor medida en sistemas pastoriles.

¿Pueden las herramientas tecnológicas de la AP y de análisis geoestacial ser utilizadas en sistemas ganaderos para la toma de decisiones en el manejo de las pasturas?

1.1. OBJETIVO GENERAL

El trabajo tiene como objetivo principal cuantificar, analizar y mapear la variabilidad espacial de la biomasa de forraje y su relación con algunas propiedades físico-químicas del suelo a escala de potrero en pasturas de *Festuca arundinacea* sembradas

sobre suelos de la Unidad Alférez. Además, se buscó identificar las zonas más frecuentadas por los animales durante el pastoreo.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la pastura mediante la biomasa disponible, altura, proporción de festuca, índice de vegetación de diferencia normalizada (NVDI) y componentes de calidad del forraje (proteína cruda, fibra detergente neutro, fibra detergente ácido).
- Conocer las relaciones existentes entre los distintos parámetros medidos en la pastura.
- Caracterizar algunas propiedades físico-químicas de los suelos sobre los que se desarrolla la pastura y sus relaciones.
- Evaluar la relación entre la cantidad y calidad de la biomasa disponible y la frecuencia de visitas de pastoreo realizadas por los animales.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. VARIABILIDAD ESPACIAL

El concepto de variabilidad espacial hace referencia a la presencia de diferentes valores de un descriptor medido en diferentes lugares a un mismo tiempo (Laca y Lemaire 2000, Adler et al. 2001, Ettema y Wardle 2002). Actualmente existe amplia evidencia acerca de la importante variabilidad espacial que pueden presentar las propiedades del suelo y la producción vegetal, incluso a pequeñas distancias, como consecuencia tanto de factores y procesos de formación de suelo, como del manejo del mismo (Morales, 2004). Según Robert (1999), la existencia de variabilidad en las propiedades o factores determinantes de la producción en los agroecosistemas no es una novedad, lo que es diferente, en realidad, es la posibilidad de identificar, cuantificar y mapear esa variabilidad (Mantovani et al., 2006). Esta variabilidad observada puede ser considerada o representar una ventaja, siempre y cuando se comprenda su naturaleza, ya que la caracterización y posterior toma en consideración de la misma puede ser utilizada para diseñar medidas agronómicas que tengan en cuenta las necesidades específicas de distintas zonas en el interior de una misma parcela o en el conjunto de parcelas que forman una explotación (Morales, 2004).

La variabilidad de las distintas propiedades dentro de una unidad de mapeo de suelo y dentro de las más pequeñas unidades de muestreo, como campos, parcelas experimentales o padrones, se reconoce a menudo por métodos estadísticos clásicos (Beckett y Webster, 1971). Como bien señalan Mulla y McBratney (2002), en la estadística clásica, una población se caracteriza por su distribución de frecuencias utilizando parámetros como la media y el desvío estándar (DE). Además, mencionan que la dispersión de los valores alrededor de la media que se representa mediante el DE, es una medida de la variabilidad de una población muestreada, al igual que el coeficiente de variación (CV) y el rango. Identificar la variabilidad a través de estos parámetros podría proporcionar información valiosa para definir las estrategias de manejo a una escala de paisaje y por parcela (Trotter et al., 2014).

Sin embargo, Pravia (2009) afirma que la distribución de frecuencias no provee ninguna información sobre la correlación espacial entre las muestras. A su vez, Trangmar et al. (1985) mencionan que la estadística clásica asume que la media de la unidad de muestreo es el valor esperado en todas partes de la misma y que este enfoque da por hecho que la variabilidad sobre la media es aleatoria y no contiene ninguna referencia geográfica de las diferencias dentro de las unidades de muestreo.

La estructura espacial de una población puede ser estimada utilizando técnicas geoestadísticas (Matheron 1963, Webster y Oliver 2007), que a diferencia de la estadística clásica considera que los lugares más cercanos poseen valores más parecidos para la variable a aquellos más alejados, fenómeno denominado autocorrelación (Goovaerts 1999, Mantovani et al. 2006). Aún así, González (1998) menciona que los análisis

realizados por la estadística clásica y el análisis geoestadístico no son excluyentes, sino que se pueden complementar. Por lo que para el estudio espacial de cualquier propiedad del suelo o planta, primero se puede realizar un estudio estadístico preliminar y posteriormente, el estudio estructural y la interpolación de datos en puntos no medidos (Morales, 2004).

2.1.1. Aplicación de la geoestadística en el análisis de la variabilidad espacial

La geoestadística puede definirse como la rama de la estadística destinada al análisis de procesos distribuidos espacialmente (Journel, 1986). Esta disciplina proporciona un conjunto de herramientas para el procesamiento de datos con algún patrón de distribución espacial (Best y León, 2006a). El análisis geoestadístico de la variabilidad espacial ha sido aplicado ampliamente en la industria minera (David 1977, Journel y Huijbregts 1978, Clark 1979), en la investigación de recursos hídricos (Delhomme 1978, 1979), en las ciencias del suelo (Burgess y Webster 1980, Yost et al. 1982, Shi et al. 2000, Serrano et al. 2010, Trotter et al. 2014, Bernardi et al. 2016, 2017) y en menor medida en la producción vegetal (Hirata y Fukuyama 1997, Hirata 2002, Pravia 2009).

Este nuevo enfoque utiliza los patrones geográficos de los datos para explicar de mejor forma la variabilidad espacial (Matheron 1963, Best y León 2006a). Según Journel (1986) el análisis geoestadístico se divide en tres etapas: 1) análisis exploratorio de los datos, 2) análisis estructural donde se estudia la continuidad, dependencia y estructura espacial de la variable de muestreo y 3) predicción de los valores de la variable en sitios que no fueron muestreados.

Para Myers (1991), una variable para ser considerada en un análisis geoestadístico debe tener una distribución cercana a la curva normal, ya que es un requisito para la obtención de semivariogramas experimentales, debido a que éstos son sensibles a la simetría de las distribuciones. En el mismo sentido, Paz-González et al. (2001) afirman que la interpolación por kriging presenta mejores resultados cuando la distribución de los datos se acerca a una distribución de este tipo.

Además, según Morales (2004), es necesario definir si la variable puede ser considerada estacionaria o de lo contrario, existe una tendencia determinada. El supuesto de estacionaridad considera que el nivel promedio de la variable debe ser constante en todos los puntos del área de estudio, es decir, no deben existir tendencias (Giraldo, 2003).

2.1.1.1. Descripción del semivariograma

La dependencia espacial entre los valores encontrados en función de la distancia que separa las muestras se determina a través de la construcción de un semivariograma (Goovaerts, 1999). El semivariograma mide la disimilaridad promedio entre pares de datos separados por un vector de distancia. El ajuste de un modelo para el semivariograma observado permite predecir el valor de la variable en sitios no muestreados utilizando

información recabada en sitios vecinos, además de obtener mapas de isovalores para visualizar y analizar la variabilidad espacial (Wollenhaupt et al., 1997).

Este semivariograma es una función básica que describe y cuantifica la dependencia espacial de una variable, es decir, su autocorrelación espacial (Vieira 2000, Vieira et al. 2002) y se calcula como la mitad del cuadrado de la diferencia entre los componentes de pares de datos (Goovaerts, 1997), de acuerdo con la siguiente ecuación:

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

donde, $z(x_i)$ y $(x_i + h)$ son observaciones de la variable a posiciones x_i y $x_i + h$, respectivamente, h es la distancia entre observaciones y $N(h)$ refiere al número de pares de observaciones separadas por la misma distancia h (Best y León, 2006a).

Este modelo representa la dependencia espacial de los valores de una variable registrados en dos puntos separados a una cierta distancia h . A medida que aumenta la distancia entre dos puntos, las diferencias entre valores registrados se van incrementando, por lo que la correlación espacial disminuye (Webster y Oliver, 2007).

La expresión gráfica de un semivariograma teórico se encuentra en la figura No. 1, donde C_0 (nugget) representa la variabilidad de la propiedad estudiada para distancias inferiores a la menor de las distancias entre muestras vecinas. La semivarianza con frecuencia aumenta con la distancia hasta un valor máximo en el que se estabiliza, este umbral de máxima semivarianza se denomina sill, se representa como $C_0 + C_1$ y es aproximadamente igual a la varianza de los datos (Morales, 2004). El rango (h), es la distancia a la que $\gamma(h)$ alcanza el sill marcando el límite de dependencia espacial (Webster y Oliver, 2007). Los valores de la propiedad estudiada dentro de este límite, son tan similares entre sí, que están espacialmente correlacionados (Webster y Oliver, 2007). A partir de esta distancia la correlación entre muestras de una variable es nula, pasando a tener una distribución aleatoria y ser independientes entre sí (Morales, 2004). Cambardella et al. (1994), sugieren que una relación nugget/sill $< 25\%$ indica una fuerte dependencia espacial, entre 25 y 75% dependencia moderada, y $> 75\%$ dependencia débil.

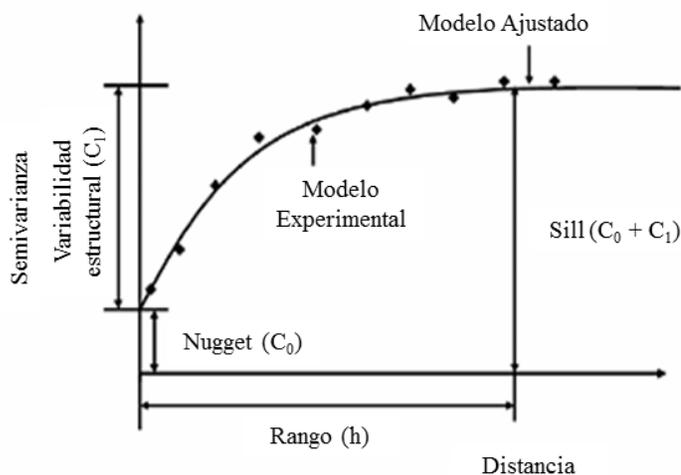


Figura No. 1. Representación gráfica de un semivariograma teórico y sus partes constituyentes

Fuente: tomado de Obando et al. (2006).

Una vez construido el semivariograma experimental, que consiste en una serie de puntos discretos, se ajusta un modelo teórico, éstos son funciones continuas con una expresión analítica sencilla (Morales, 2004). Los parámetros de las ecuaciones de las funciones teóricas que se varían para ajustarlas a los datos experimentales son el nugget, el sill y el rango (Morales, 2004). Los modelos básicos más comúnmente ajustados son: lineal, esférico, exponencial y gaussiano (Morales, 2004).

Obtenido el modelo de semivarianza se debe definir si éste es capaz de predecir de forma correcta o no a la variable estudiada, según Morales (2004), se disponen de diferentes métodos de ajuste, entre los que se encuentran el ajuste visual, el método de los mínimos cuadrados y métodos mixtos (validación cruzada).

En validación cruzada, cada dato se borra uno por uno y se estima por kriging en función de los datos restantes (Myers, 1991). La estimación del coeficiente de determinación entre los valores estimados y medidos, la suma de los errores cuadrados y el error medio se calculan en este método, y representan los criterios de ajuste del modelo (Myers, 1991).

2.1.1.2. Interpolación mediante kriging

El kriging es el método clásico de interpolación en geoestadística que permite determinar valores de una variable medida en cualquier punto del terreno estudiado, sin tendencia y varianza mínima, basándose en su semivariograma (Morales, 2004). A diferencia de otros métodos de interpolación, que utilizan estimadores que asignan un mayor peso a los puntos situados más cerca, en la interpolación por kriging esto no es

necesario, ya que al utilizar el semivariograma se tiene en cuenta la autocorrelación entre puntos próximos (Samper y Carrera 1990, Gómez Suárez 1998).

Este método de interpolación permite generar mapas 2D de isovalores para visualizar y analizar la variabilidad espacial de las variables bajo estudio (Morales, 2004). Melchiori et al. (2001) afirman que la aplicación de métodos geoestadísticos permiten conocer distintos aspectos relacionados a la variabilidad de propiedades distribuidas espacialmente y que el desarrollo de este tipo de mapas permite delimitar diferentes ambientes edáficos-productivos, lo cual contribuiría a alcanzar un manejo sitio específico y sacar el máximo provecho de la superficie de producción.

2.2. VARIABILIDAD ESPACIAL EN LA BIOMASA DISPONIBLE

La disponibilidad de forraje es uno de los atributos más importantes para evaluar un recurso forrajero, donde la cantidad de biomasa vegetal disponible es muy dinámica en el tiempo y espacio, cambiando permanentemente en función del crecimiento, senescencia y consumo por parte de los animales (Pravia et al., 2013). Esta biomasa, o materia seca disponible, es definida por Hodgson (1990) como la cantidad total de forraje que existe por unidad de superficie en un momento dado.

Las mediciones de disponibilidad de materia seca (MS) son esenciales para determinar aspectos relevantes del sistema como la carga, la ganancia animal, la productividad de las pasturas, y para evaluar distintas estrategias de manejo en sistemas pastoriles (Mannetje, 2000). Sin embargo, en la mayoría de los casos se estima la disponibilidad de forraje sin considerar la variabilidad espacial de esa biomasa disponible. Hill et al. (1999) mencionan que en general, las praderas tienden a manejarse como unidades individuales, ignorando la existencia de gradientes de productividad en todo el paisaje.

Incluso en pasturas monoespecíficas se forma un mosaico de parches cortos intensamente pastoreados con baja cantidad de forraje, parches altos sin pastorear o ligeramente pastoreados con alta cantidad de forraje y una zona de transición con altura, utilización y cantidad de forraje intermedia (Hirata, 2002). Una característica en común que poseen todas las pasturas bajo pastoreo es la gran variabilidad espacial y temporal de los ambientes. Espacialmente, esta variabilidad se produce en escalas que van desde partes de plantas a escala de región, lo que resulta en un parcheado del forraje en calidad y cantidad en las parcelas (Faber, 2012).

La variabilidad en la disponibilidad de forraje es el resultado de muchos factores diferentes que interactúan como especies, suelos, precipitaciones, temperatura, fertilidad, riego, etc. (Dennis et al., 2015). Laca (2009a) suma al proceso de pastoreo y su distribución espacial como factores que pueden generar, mantener, o reducir la heterogeneidad de las pasturas. Además, el mismo autor afirma que la variabilidad espacial en composición y cantidad de forraje afectan el comportamiento animal y la relación entre la cantidad de forraje promedio por unidad de área y la performance animal.

A nivel de investigación nacional la información acerca de la variabilidad espacial que presenta la masa de forraje disponible en pasturas sembradas es escasa o nula, encontrándose tan solo trabajos que reportan la variabilidad en la cantidad de forraje disponible promedio a escala temporal (García et al. 1981, Pereyra 2019). Sin embargo, autores como Hirata y Fukuyama (1997), Hirata (2002) utilizaron el CV para describir la variabilidad espacial en la biomasa disponible y encontraron que para pasturas de *Paspalum notatum* bajo pastoreo rotativo al suroeste de Japón, este parámetro variaba entre 22 y 94 % mientras que para la biomasa remanente reportan valores entre 35 y 211 %. Además, ambos trabajos concluyen que en pasturas bajo pastoreo el CV de la masa disponible siempre aumenta, estando positivamente correlacionado con la utilización del forraje.

2.3. VARIABILIDAD ESPACIAL EN ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO

Las propiedades físico-químicas del suelo como textura, contenido de materia orgánica (MO), nutrientes, concentración de sales, pH, entre otras, presentan variabilidad espacial dentro del campo, las cuales pueden incidir en el crecimiento y desarrollo vegetal y, por ende, en la distribución espacial de los rendimientos (Johnson et al. 2001, Sudduth et al. 2005, Corwin et al. 2006). Según Beckett y Webster (1971), Starr et al. (1995), Briggs et al. (2006) esta variabilidad espacial es producto de perturbaciones naturales y antropogénicas, como por ejemplo factores de formación de suelo y prácticas de manejo.

Obando et al. (2006) mencionan que existe mayor variabilidad en las propiedades químicas que en las físicas, y en los suelos sometidos al uso agropecuario que en aquellos que se encuentran en su condición natural. Además, la ausencia de labranza en pasturas (Fisher et al., 1998), así como la deposición irregular de excremento y orina de los animales como observaron Petersen et al. (1956), McCormick et al. (2009), son algunas de las causas de la variabilidad de nutrientes en el suelo, como también, cambios en la topografía que afecta el transporte y almacenamiento de agua a través y dentro del perfil del suelo (Mulla y McBratney, 2002).

La variabilidad espacial de distintas propiedades del suelo (carbono orgánico, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, capacidad de intercambio catiónico, pH, y conductividad eléctrica aparente) se han evaluado en diversos países a través de parámetros estadísticos clásicos como el CV, así como por métodos geoestadísticos mediante la construcción de semivariogramas. Sin embargo, son pocos los trabajos nacionales que hayan desarrollado esta metodología en la comprensión de esta heterogeneidad espacial en propiedades edáficas (Pravia 2009, Coitiño-López et al. 2015). Algunos de los resultados obtenidos por la literatura nacional e internacional en relación a este tema se muestran desde el cuadro No. 1 al cuadro No. 8.

2.3.1. Variabilidad espacial en el contenido de carbono orgánico del suelo

El carbono orgánico del suelo (COS) afecta la mayoría de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo vinculadas con su calidad (Carter 2002, Wander et al. 2002), sustentabilidad (Carter 2002, Acevedo y Martínez 2003) y capacidad productiva (Bauer y Black 1994, Sanchez et al. 2004). El contenido del COS es el resultado de un balance entre los ingresos de materiales de origen vegetal y los egresos, dados por la erosión y la degradación de los compuestos carbonados como consecuencia de la respiración microbiana (Álvarez y Steinbach, 2006). La variabilidad y distribución espacial del COS, como propiedad edáfica, está controlada parcialmente por las condiciones ambientales, cobertura vegetal y el uso del suelo (Guo et al., 2006). Por lo tanto, como mencionan Su et al. (2006) los cambios en el COS se dan en sitios específicos y dependen de condiciones biofísicas y de manejo.

Cuadro No. 1. Resultados de CV y dependencia espacial para el contenido de COS

Indicador	CV (%)	Nugget/ sill (%)	Dependencia espacial	Rango (m)	Autor/es
COS total	22	12	Fuerte	129	Cambardella et al. (1994)
	25	< 42	Moderada	> 182	Cambardella y Karlen (1999)
	17	5	Fuerte	260	Kariuki et al. (2009)

2.3.2. Variabilidad espacial en el contenido de nitrógeno

El nitrógeno (N) es el elemento que más comúnmente limita la productividad de los sistemas agrícolas, ganaderos y agrícola-ganaderos existentes en el mundo (Baethgen, 1994). Según Perdomo y Barbazán (1999) aproximadamente el 98 % del N presente en el suelo se encuentra formando compuestos orgánicos, por lo que el nivel de este nutriente en el suelo depende del contenido de materia orgánica. Sin embargo, las plantas pueden absorber únicamente el N inorgánico que representa un 2 % del N total del suelo, encontrándose en formas de nitrato, amonio y nitrito. Estas formas inorgánicas presentan baja estabilidad en el suelo, por lo que las cantidades de N inorgánico del suelo son extremadamente variables. Parte de esta variabilidad se debe también a la distribución de la orina y heces de los animales, donde alrededor del 75 a 95 % del N contenido en la pastura y los minerales ingeridos por los animales, se devuelven al suelo (Acosta 1994, Morón 1994).

Cuadro No. 2. Resultados de CV y dependencia espacial para el contenido de nitrógeno

Indicador	CV (%)	Nugget/ sill (%)	Dependencia espacial	Rango (m)	Autor/es
N total	17	17	Fuerte	115	Cambardella et al. (1994)
N total	23	< 65	Moderada	> 182	Cambardella y Karlen (1999)
N-NO ₃	28	96	Débil	260	Kariuki et al. (2009)
N-NO ₃	28	27	Fuerte a moderada	15	Arango y Jaramillo (2016)

2.3.3. Variabilidad espacial en el contenido de fósforo

Según García et al. (2014), los contenidos de fósforo (P) total dependen de la naturaleza del material madre, el grado de meteorización, la ocurrencia de lavado y los efectos antrópicos del cultivo (extracción por cosechas, aplicación de abonos y fertilizantes). Schnyder et al. (2010) examinaron el papel de los animales en la redistribución de los nutrientes a través de la excreta y concluyeron que el ganado es un factor clave en la variabilidad espacial del P, en particular la concentración de éste en las alturas. Asociado a esto, Robinson et al. (1983), Taylor et al. (1987) en diferentes ensayos en Australia, observaron que las zonas de alta concentración de P correspondían a las partes más altas del campo, asociadas comúnmente con las actividades de descanso del ganado.

Cuadro No. 3. Resultados de CV y dependencia espacial para el contenido de fósforo

Indicador	CV (%)	Nugget/ sill (%)	Dependencia espacial	Rango (m)	Autor/es
P Bray 1	43	17	Fuerte	71	Cambardella et al. (1994)
P Olsen	24	73	Moderada a débil	177	Shi et al. (2000)
P Mehlich 3	40	0	Fuerte	260	Kariuki et al. (2009)
P Resina	85	94	Débil	66	Bernardi et al. (2016)

2.3.4. Variabilidad espacial en el contenido de potasio

El potasio (K) presenta movilidad en el suelo, pudiendo ser redistribuido en el perfil, por el flujo de agua (movilidad vertical) y por absorción y reciclaje por las plantas (movilidad horizontal). Este nutriente presenta mayor predominio en fracciones arcillosas que en las arenosas, aunque su contenido varía en función de la intensidad de las pérdidas por extracción del cultivo, lavado y erosión (Pellegrini, 2017).

Para Souza et al. (1997) la variabilidad del K en el suelo está muy relacionada con la distribución del forraje, pues este elemento no forma compuestos orgánicos en el tejido de las plantas, y es fácilmente transportado desde la parte aérea hacia el suelo luego de las lluvias. Por lo que los mismos autores afirman, que los contenidos de K en el suelo es una de las propiedades más afectadas por el manejo antrópico en términos de variabilidad.

Cuadro No. 4. Resultados de CV y dependencia espacial para el contenido de potasio

Indicador	CV (%)	Nugget/ sill (%)	Dependencia espacial	Rango (m)	Autor/es
K int	35	25	Fuerte	62	Cambardella et al. (1994)
	33	56	Moderada	75	Cambardella y Karlen (1999)
	66	64	Moderada	132	Fu et al. (2013)
	38	67	Moderada	165	Bernadi et al. (2016)

2.3.5. Variabilidad espacial en el contenido de calcio y magnesio

Los contenidos de calcio (Ca) y de magnesio (Mg) varían principalmente debido a la región, en función del material parental y las condiciones de meteorización durante la formación de los suelos (Rabuffetti, 2017b). Larrea (2019), menciona que el valor de estos nutrientes en el suelo son el resultado del balance entre pérdidas (extracción por cultivos, lavado y erosión) y aportes (residuos animales y vegetales, sedimentación derivada de la erosión y aplicación de enmiendas). Además, afirma que los contenidos de estas bases presentan elevada variabilidad sitio específica generada no solo por el tipo de suelo, sino también, por la actividad antrópica que se desarrolla en cada uno de los mismos.

Según Rabuffetti (2017b), tanto el Ca como el Mg intercambiable se encuentran en mayor cantidad en suelos de alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) como suelos arcillosos y de elevada concentración de materia orgánica, que en suelos arenosos y de baja CIC. Por otro lado, este autor indica que desempeñan un rol fundamental al contrarrestar la acidificación de suelos y aguas, contribuyendo a mejorar el poder buffer de los suelos y la disminución de la saturación de cationes.

Cuadro No. 5. Resultados de CV y dependencia espacial para el contenido de Ca y Mg

Indicador	CV (%)	Nugget/ sill (%)	Dependencia espacial	Rango (m)	Autor/es
Ca	22	56	Moderada	55	Cambardella y Karlen (1999)
	15	93	Débil	71	Bernardi et al. (2016)
Mg	31	0,074	Fuerte	46	Cambardella y Karlen (1999)
	21	85	Débil	62	Bernardi et al. (2016)

2.3.6. Variabilidad espacial en la capacidad de intercambio catiónico

La CIC, es una propiedad química del suelo estrechamente vinculada a su fertilidad, depende de los coloides inorgánicos (arcillas cristalinas, geles amorfos, óxidos y sesquióxidos de hierro y aluminio), del contenido de MO del suelo (Martínez et al., 2008) y tiene relación positiva con el aumento del pH (Pratt y Bair, 1962). Durán et al. (s.f.) afirman que esta propiedad presenta una gran importancia desde el punto de vista agronómico dado que le brinda al suelo capacidad buffer con respecto a los cambios en la composición catiónica de la solución, asegurando de esa forma la nutrición catiónica de las plantas.

Cuadro No. 6. Resultados de CV y dependencia espacial para la CIC

Indicador	CV (%)	Nugget/ sill (%)	Dependencia espacial	Rango (m)	Autor/es
CIC	21	0,05	Fuerte	100	Obando et al. (2006)
	12	28	Moderada	54	Kilic et al. (2012)
	7	69	Moderada	65	Bernardi et al. (2016)

2.3.7. Variabilidad espacial en el pH del suelo

El pH de un suelo es principalmente función de la composición del mismo y de las relaciones de intercambio iónico e hidrólisis que ocurren entre los distintos componentes del suelo (Rabuffetti, 2017a). El mismo autor afirma que la mayoría de los suelos del Uruguay en su condición natural, son ligeramente ácidos y con pH que en general aumenta hacia el subsuelo.

El pH es considerado como una de las principales propiedades del suelo (Scott 1981, Carámbula 2003), debido a que controla muchos de los procesos químicos que en él ocurren, afectando específicamente la producción de forraje en pasturas sembradas a través de su efecto en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, mediante la acción indirecta sobre las poblaciones y actividades de los organismos responsables de las

transformaciones de estos elementos. En este sentido Carámbula (2003) afirma que esta propiedad es quizás la más importante en la determinación de la fertilidad del suelo.

Scott (1981), afirma que el pH es una de las propiedades químicas del suelo que menos varía, debido a que es una característica intrínseca de la génesis del suelo. Es así, que diversos estudios muestran que su CV fluctúa entre 2 a 15 % en aquellos suelos donde predominan texturas medias a arenosas (Xu y Webster 1984, de Carvalho et al. 2002, Shi et al. 2002, Cox et al. 2006). Conocer el pH del suelo (Carámbula, 2003), así como su distribución en el campo (Scott, 1981), resulta fundamental al momento de seleccionar la o las especies forrajeras a sembrar, así como la dosis y fuente de fertilizante más eficiente y conveniente.

Cuadro No. 7. Resultados de CV y dependencia espacial para pH

Indicador	CV (%)	Nugget/ sill (%)	Dependencia espacial	Rango (m)	Autor/es
pH	13	56	Moderada	55	Cambardella y Karlen (1999)
	7	7	Fuerte	74	Obando et al. (2006)
	6	99	Aleatoria	10.000	Bernardi et al. (2016)
	8	33	Moderada	620	Fu et al. (2013)

2.3.8. Variabilidad espacial en la conductividad eléctrica aparente del suelo

La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica, el valor será más alto cuanto más fácil se mueva la corriente a través del mismo (Barbaro et al., s.f.), en tanto la conductividad eléctrica aparente (CEa) es una medida de la conductividad eléctrica media representativa del perfil del suelo hasta una cierta profundidad (Cook y Walker, 1992). Esta característica del suelo está influenciada por una combinación de propiedades físico-químicas del mismo, incluyendo el contenido de humedad, la CIC, el contenido de MO, arcilla, sales, entre otras (Corwin y Lesch 2003a, Serrano et al. 2010).

Cuadro No. 8. Resultados de CV y dependencia espacial para la CEa a 30 cm de profundidad

Indicador	CV (%)	Nugget/ sill (%)	Dependencia espacial	Rango (m)	Autor/es
CEa 30cm	45	36	Moderada	76	Jabro et al. (2010)
	26	83	Débil	140	Paggi et al. (2011)
	5	38	Moderada	-	Coitiño-López et al. (2015)
	60	25	Fuerte	185	Bernardi et al. (2016)

2.4. EL PROCESO DE PASTOREO Y SU DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

Las distintas actividades que realizan los animales en pastoreo inciden en la estructura y funcionamiento de las pasturas, alterando procesos que intervienen en la productividad primaria, la descomposición de MO, y en consecuencia en el ciclado de nutrientes a través del pisoteo, defoliación, arrancado de matas y deyecciones (Pieper 1994, Bailey y Provenza 2008).

La distribución de los animales en pastoreo es principalmente el producto de la agregación de decisiones individuales sobre qué y dónde pastorear (Newman, 2007). Estas decisiones tienden a generar patrones agregados de distribución animal que se traducen en una falta de uniformidad en el uso del ambiente (Coughenour, 1991). Esta distribución de los animales en pastoreo tiene profundos efectos sobre la variabilidad espacial de las pasturas (Hobbs 1996, Dumont et al. 2007), a su vez, esta variación en la vegetación ejerce una fuerte influencia sobre el comportamiento de los animales, modificando su distribución (Senft et al. 1987, Coughenour 1991, Bailey y Provenza 2008, Díaz Falú et al. 2014). Por lo que, Brizuela et al. (2015) afirman que las decisiones tomadas por los animales acerca de cuándo y dónde realizar el bocado generan un fenómeno cíclico donde los animales modifican en diferente grado la estructura y composición botánica de un sitio, y esa modificación puede alterar su futuro desplazamiento.

Según Díaz Falú et al. (2014) las características estructurales de la pastura, composición botánica, la cantidad y calidad del forraje disponible influyen en la distribución espacial de los animales. Además, la ubicación del agua de bebida, el tamaño y forma del potrero, el ambiente físico (topografía, exposición, suelos), las variaciones meteorológicas (vientos, temperaturas, presión atmosférica), el estado fisiológico y conformación social del grupo de animales son factores que influyen en el patrón de distribución del pastoreo (Stuth 1991, Herrera 2018). Bailey y Provenza (2008), agregan a la disponibilidad de sombras y reparo como factores que afectan la uniformidad del pastoreo.

Según Bailey (2005), los animales prefieren pastorear lugares con pendientes suaves que pronunciadas y evitan largos desplazamientos horizontales o verticales en dirección al agua. Vallentine (1990) menciona que el número y ubicación de las aguadas son factores que gobiernan la distribución y concentración de los animales en pastoreo, cobrando mayor relevancia en momentos de temperaturas elevadas. De aquí que para analizar la distribución de los animales en pastoreo se debe tener en cuenta, el ambiente, el animal y la interacción entre ambos (Launchbaugh y Howery, 2005).

Stafford Smith (1988) afirma que las decisiones de pastoreo ocurren dentro de una jerarquía de necesidades fisiológicas. Según el mismo autor, el balance hídrico (sed), la termorregulación, las necesidades nutricionales y el descanso determinan si un animal decide moverse, permanecer en un lugar o frecuentar determinados sitios de una pastura. Según Carvalho et al. (2008), los animales alteran sus actividades y subsecuentes

movimientos dentro de la pastura según la mayor o menor satisfacción de estas necesidades, además agrega, que se afecta el pastoreo y la probabilidad de que un sitio dado pueda ser más o menos frecuentado por los animales. En este sentido, Laca (2009a) menciona que, en el afán de cubrir sus necesidades fisiológicas, los animales en pastoreo son un factor determinante en la creación de áreas que difieren en calidad y cantidad de forraje generando incrementos en la heterogeneidad espacial, aún en pasturas monoespecíficas, debido al efecto de la defoliación, orina, aparición de especies indeseables, topografía, efecto de la sombra, cercanía de la aguada, etc.

Para Carvalho et al. (2008) las acciones de los animales en pastoreo son tomadas en diferentes escalas espacio-temporales. Bailey et al. (1996) identificaron seis escalas para los grandes herbívoros en la jerarquía del pastoreo: bocado, estación alimenticia, parche, sitio de pastoreo, campo de pastoreo y región de pastoreo. En cada escala se observan patrones de alimentación distintos, así como también son distintos los objetivos de los animales y la importancia de determinados parámetros.

La menor escala de decisión del animal es el bocado, que significa la acción o acto de aprehender el forraje con la boca (Gibb, 1998). La estación de alimentación fue definida por Novellie (1978) como el área de plantas disponible para el herbívoro sin mover sus patas delanteras. Según Bailey et al. (1996), un parche es un agregado de estaciones alimenticias separado de otros parches por un detenimiento en la secuencia de pastoreo, cuando el animal se reorienta para una nueva ubicación. Estos mismos autores definieron un sitio de pastoreo como un agregado de parches en un área contigua donde los animales pastorean durante una sesión (delimitada por una interrupción de la acción de pastoreo para descanso, rumia, etc.). Un campo de pastoreo es un agregado de los diferentes sitios de pastoreo con un foco común donde los animales buscan agua, descanso o sombra. El nivel regional de pastoreo se define por un agregado de campos de pastoreo definido por cercas, barreras, etc. (Carvalho et al., 2008).

De acuerdo con Cid y Brizuela (1998), el ganado prefiere pastorear repetidamente en parches intensamente pastoreados si su altura no es limitante de la tasa de consumo o si el animal compensa la reducción del tamaño de bocado por incremento de la tasa de bocado. En este sentido, varios autores han reportado que los animales prefieren consumir repetidamente parches bajos (7-10 cm), debido al mayor valor nutritivo que les confiere el rebrote y que rechazan aquellos parches altos (> 30 cm), maduros y con mayor cantidad de material senescente (Wallis de Vries y Daleboudt 1994, Cid y Brizuela 1998). De igual manera O'Regain y Schwartz (1995) vieron que hay una respuesta consistente de los animales al parcheado, donde seleccionan parches de mayor valor nutritivo (parches sobre-pastoreados) y productivos y rechazan los de menor valor nutritivo (parches que no son pastoreados).

Hirata y Fukuyama (1997), mostraron que los animales consumieron más en parches con mayor cantidad de forraje cuando la cantidad de forraje promedio de la pastura fue menor. En este sentido, Hirata (2002) indica que cuando la estructura del

forraje se caracteriza por una mayor proporción de parches altos, maduros y de baja digestibilidad los animales seleccionarán a favor de aquellos parches más bajos y de mayor valor nutritivo, sin embargo, los animales consumirán mayor cantidad de forraje de parches altos, con mayor cantidad de forraje cuando la intensidad de pastoreo es mayor, o cuando la altura remanente es menor. Sumado a esto, Carvalho et al. (2008) observaron que, en menores alturas de pastura, los animales caminan menos entre estaciones alimenticias y se desplazan más rápidamente. Mientras que, en situaciones de abundancia de forraje, los animales tienen altas tasas de ingestión y mastican bocados de alta masa de forraje mientras caminan distancias más largas, utilizando más tiempo para la búsqueda de los sitios de pastoreo preferidos.

2.5. AGRICULTURA DE PRECISIÓN

La cuantificación de la variabilidad de las propiedades del suelo y la productividad vegetal constituyen el principal objetivo en las investigaciones relacionadas con las ciencias agrícolas, por tanto, esta información puede ser obtenida a nivel de pequeñas áreas aplicando los conceptos enmarcados dentro de la AP (Morales, 2004).

La aplicación de tecnologías de AP permite obtener información georreferenciada, estudiar su variabilidad espacial, incorporarla en el análisis estadístico de experimentos a escala de parcela, y predecir sus efectos en el rendimiento de los cultivos utilizando modelos de simulación (Paggi et al., 2011). La AP no consiste solamente en medir la variabilidad existente en el área, sino también en la adopción de prácticas administrativas que se realicen en función de esa variabilidad.

Este nuevo concepto de AP se comenzó a delinear a partir de la década del '70 con los estudios sobre automatización de máquinas agrícolas. En forma complementaria, a fines de los '80 y comienzos de los '90 con la liberación del sistema de posicionamiento global por satélite (GPS) para uso civil, fue posible desarrollar equipos inteligentes que permitieron el manejo localizado de las prácticas agrícolas, con una mayor eficiencia de aplicación de insumos, reduciendo el impacto sobre el medio ambiente y, en consecuencia, disminuyendo los costos de producción de alimentos.

La aplicación del concepto de AP ha sido posible debido al desarrollo de cinco tecnologías (Brase, 2006). Los sistemas de posicionamiento global por satélite (GPS), los sistemas de información geográfica (SIG), sensores remotos, dispositivos e implementos inteligentes (DII) y computadoras. Los primeros permiten asociar un dato particular con su posición real mediante el cálculo de longitud y latitud por trilateración. Los SIG no solo permiten obtener mapas digitales asociados a una base de datos concreta, sino que brindan la oportunidad de llevar a cabo un análisis estadístico y espacial de éstos. Los sensores remotos permiten crear imágenes digitales capaces de identificar la variabilidad dentro del campo que junto a otras técnicas de análisis puede ser usada para detectar zonas homogéneas y desarrollar un manejo sitio específico. Los DII también conocidos como sensores y controladores, son herramientas que permiten recopilar datos de diversos

eventos o características físicas de un objeto y/o controlar un equipo basado en esas características (Brase, 2006).

La AP ha sido la herramienta fundamental para el desarrollo del manejo sitio específico y son en la actualidad considerados los enfoques más viables para lograr el desarrollo sostenible de los agroecosistemas (Corwin et al., 1999). En los últimos años la agricultura incorporó muchas de estas tecnologías de precisión (Best et al. 2006b, Brase 2006). En paralelo, la ganadería avanzó en el proceso de intensificación, pero no en igual medida que la agricultura (Díaz, s.f.). Laca (2009b) menciona que en la mayoría de los casos las herramientas de AP han sido evaluadas y desarrolladas en sistemas agrícolas intensivos, prestándole poca atención a los sistemas pastoriles o sistemas agrícolas-ganaderos. Las interacciones suelo-planta son temas específicos de la AP, donde el objetivo principal es explorar la heterogeneidad espacial natural para aumentar la eficiencia y reducir los impactos en el medio ambiente (Laca, 2009b). La ganadería de precisión (GP) suma el componente animal y estudia esa heterogeneidad en el espacio relacionada a las interacciones suelo-planta-animal con el objetivo de mejorar la sustentabilidad productiva, económica y social del sistema ganadero (Laca, 2009b).

La adopción de herramientas de precisión como mediciones georreferenciadas de propiedades de suelo y planta a través de aparatos GPS, la construcción de mapas zonales, que permitan analizar la variabilidad de éstas características, así como el monitoreo remoto de animales, que ayuden a conocer la distribución espacial de éstos, y, a partir de esta información, inferir conclusiones sobre su comportamiento (Gorandi et al., 2016), permitirían hacer un manejo por ambiente y contribuirían al desarrollo de una GP, mejorando la sustentabilidad al largo plazo de los sistemas ganaderos. En este sentido, Schellberg et al. (2008) afirman que, todos los principios y conceptos técnicos asociados a la AP pueden aplicarse y que, todas estas tecnologías están disponibles y pueden usarse con éxitos en el manejo de las praderas. Aún así, detectar la variación espacial dentro de éstas es el mayor desafío debido a la influencia que tiene el pastoreo animal y a la complejidad de los sistemas pastoriles (Bongiovanni y Lowenberg-Deboer 2004, Schellberg et al. 2008).

2.5.1. Tecnologías disponibles asociadas a la agricultura de precisión

2.5.1.1. Mediciones de la CEa a través del sensor VERIS 3100®

Este sensor mide la CEa a 30 cm y 90 cm de profundidad del suelo de manera georreferenciada y puede ser fácilmente trasladado mediante una camioneta pick-up o un tractor. Su funcionamiento tiene como base un conjunto de seis electrodos en forma de disco y ordenados de acuerdo a una matriz tipo Wenner array (Rhoades, 1993). El método Wenner array cuantifica la resistividad, es decir, la fuerza con la que se opone un material dado a un flujo de corriente eléctrica.

Este aparato posee tres pares de discos como electrodos para determinar la CEa del suelo que se muestra en la figura No. 2. Los discos están montados sobre un bastidor, a su vez, estos discos penetran en la superficie del suelo a una profundidad de aproximadamente 5-6 cm. El par de discos 2 y 5 tiene la función de emitir una corriente eléctrica en el suelo, mientras que los discos 1, 3, 4 y 6 detectan el grado de disminución en la corriente eléctrica emitida a causa de su transmisión a través del suelo (resistencia). El par central (discos 3 y 4) lee la resistencia ofrecida por el suelo de 0-30 cm de profundidad, mientras que el par externo (discos 1 y 6) lo hace de 0-90 cm. El grabador de datos del equipo trabaja acoplado a un DGPS (Sistema de Posicionamiento Global Diferencial), donde almacenan un dato por segundo de conductividad eléctrica en miliSiemens por metro ($\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$) y la posición exacta (latitud y longitud) al momento de la medición (Johnson et al. 2001, Veris Technologies 2014).

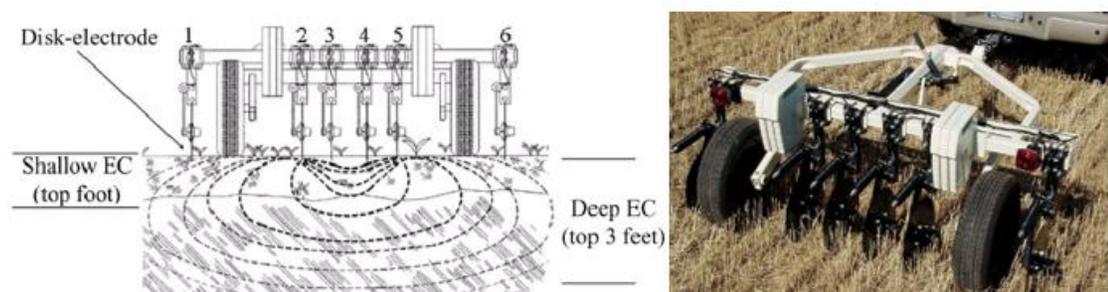


Figura No. 2. Representación esquemática del sensor VERIS 3100®

El principio físico de las mediciones de CEa, se basa en las diferencias en el potencial eléctrico basado en tres fases que actúan en paralelo (Rhoades et al. 1999, Corwin y Lesch 2003a), fase sólida/líquida: cationes intercambiables asociados a los minerales de arcilla o materia orgánica, fase líquida: sólidos disueltos contenidos en el agua que esta retenida en los poros grandes del suelo y fase sólida: partículas de suelo que están en contacto directo y continuo con otras partículas.

Sudduth et al. (2005) estudiaron la relación entre los datos de CEa con los valores medios de algunas propiedades del suelo para 12 campos en 6 estados del centro-norte de los Estados Unidos y reportan valores promedios de CEa para una profundidad 0-30 cm que van desde 5,2 a 35,2 $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$. A su vez, Paggi et al. (2011) trabajando sobre suelos del grupo Argiudoles o Paleudoles de la Estación Experimental Agropecuaria de Balcarce observaron valores medios de CEa para la misma profundidad de 19,3 $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ y un DE 5,1 $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$. En el caso de Uruguay, Pravia (2009) encontró para suelos Argiaquolls Abrúpticos y Argiudolls Verticales Oxyaquic, del este del país valores promedios de CEa para los primeros 30 cm de profundidad de 30 $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$, con un DE igual a 13 $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$. Mientras que Coitiño-López et al. (2015), obtuvieron un valor promedio de 59,7 $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ y un DE de 2,9 $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ en suelos bajo agricultura continua en siembra directa, clasificado como Argiudol típico de textura franco arcillosa del departamento de Soriano.

Diversos trabajos han relacionado la CEa con una serie de propiedades diferentes del suelo. Por ejemplo, la humedad del suelo (Kachanoski et al. 1988, Sheets y Hendrickx 1995), contenido de arcilla (Williams y Hoey, 1987), la CIC, Ca y Mg intercambiables (McBride et al., 1990). Farahani y Flynn (2007), afirman que las mediciones de CEa se pueden asociar a distintas propiedades físico-químicas del suelo, con la ventaja de que las medidas de esta característica son estables en el tiempo, debido a que los valores relativos de CEa cambian con la variación en el contenido hídrico del suelo, pero los patrones de un mapa de CEa permanecen estable año tras año.

La CEa podría convertirse en un potencial estimador de la variabilidad espacial de algunas propiedades del suelo y por lo tanto de la productividad de una determinada zona (Kitchen et al. 2005, Corwin et al. 2006b, Serrano et al. 2010, Paggi et al. 2011). Tal es así, que Simón et al. (2013) en la provincia de Córdoba Argentina evaluaron si esta propiedad podía utilizarse como estimador de propiedades del suelo y nutrientes. Los resultados mostraron que los valores de arcilla, limo, arena, MO, P y pH presentaron correlaciones significativas con la CEa, mientras que los contenidos de N como NO_3 y azufre como S- SO_4 presentaron correlaciones débiles e inconsistentes.

Por su parte, Corwin et al. (2003b) encontraron para suelos de textura limo arcillosa del centro de California que la CEa en todo el perfil poseía una correlación alta y positiva ($r > 0,7$; $p\text{-valor} \leq 0,01$) con la humedad del suelo, el contenido de boro, el porcentaje de arcilla y el porcentaje de saturación de bases, y correlaciones un poco más débiles $r = 0,33$ y $0,22$ para pH y N como NO_3 respectivamente.

A nivel nacional, Coitiño-López et al. (2015) estudiaron las relaciones entre la CEa con distintos atributos del terreno y propiedades físicas-químicas del suelo. Los resultados muestran que la CEa de 0 a 30 cm de profundidad presentaba una correlación significativa ($p\text{-valor} \leq 0,05$) y positiva con el contenido de K, Ca, MO, porcentaje de arcilla y resistencia a la penetración medida a distintas profundidades. Sin embargo, también reportaron correlaciones significativas, aunque negativas con el contenido de sodio, porcentaje de limo, pendiente y profundidad total del suelo.

2.5.1.2. Mediciones del NVDI a través del sensor GreenSeeker™

El GreenSeeker™ es un sensor que provee un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por su sigla en inglés) el mismo se muestra en la figura No. 3. El principio del funcionamiento de este sensor consiste en la emisión de haces de luz en las bandas del rojo e infrarrojo cercano del espectro electromagnético al follaje. La luz roja (longitudes de onda de 570-680 nm) es absorbida y la luz infrarroja (longitudes de onda de 725- 1020 nm) es parcialmente reflejada por la biomasa verde de las plantas y los datos de luz reflejada en estas dos longitudes de onda son utilizados para estimar el NDVI (Verhulst et al., 2010). Este índice se calcula a partir de las mediciones de la reflectancia en los rangos de longitudes de onda antes mencionados siguiendo la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}$$

donde R_{NIR} es la reflectancia de la radiación infrarroja cercana y R_{Red} es la reflectancia de la radiación del rojo visible (Verhulst et al., 2010).

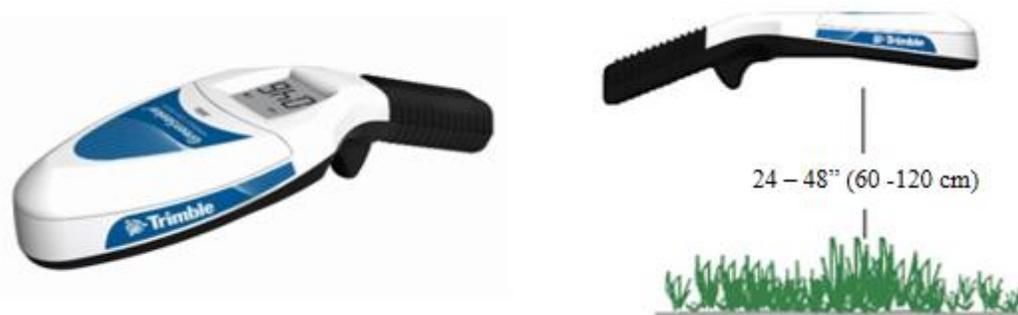


Figura No. 3. Sensor remoto GreenSeeker™

Varios autores Adamsen et al. (1999), Ma et al. (2001), Inman et al. (2005), Lan et al. (2009) mencionan que la interpretación de este índice puede contribuir al diagnóstico rápido y dirigido de las condiciones nutricionales (especialmente de nitrógeno), el estado fisiológico, la incidencia de estrés, y el rendimiento potencial de los cultivos. Además, afirman que este índice es usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación y que será mayor, cuanto mayor sea la diferencia entre las reflectancias en el infrarrojo y en el rojo.

El nivel de reflectancia, en dichas bandas del espectro, varía según las propiedades de los tejidos foliares, es decir, por su estructura celular y las interfaces entre la pared celular exterior, el protoplasto y el cloroplasto donde se encuentra la clorofila (Kumar y Silva, 1973). Los valores numéricos más grandes de NDVI se asocian con un mayor vigor de planta y mayores cantidades de biomasa sobre el suelo (Grohs et al., 2009). Este índice es también un buen indicador de las condiciones de crecimiento de diferentes tipos de materiales vegetales, por ejemplo, cultivos anuales, pasturas y bosques (Banco Mundial, 2013), por lo que permite caracterizar la distribución espacial de la vegetación, así como la acumulación de biomasa y evolución de su estado a lo largo del tiempo (Johnson et al. 2003, Tardáguila et al. 2008, Drissi et al. 2009, Stamatiadis et al. 2010).

Debido a su normalización, los rangos de medición del NDVI se encuentran entre -1 y 1, siendo los valores más altos entre 0,7 y 0,8, por encima de estos valores el índice se satura y, por lo tanto, aunque las plantas sigan creciendo no se reflejarán cambios en el NDVI (Pérez, 2018), el suelo descubierto y/o con vegetación rala, seca, o bajo estrés, presenta valores positivos aunque no muy elevados (0,2 a 0,45). La vegetación densa, húmeda, sana o bien desarrollada presenta valores de NDVI mayores a 0,5 (Monteith y Unsworth, 2008). Los suelos descubiertos generan valores positivos bajos (0,1 a 0,2), y el

agua libre valores que van desde -0,1 hasta 0,1 o 0,2. Valores de -1 se registran en superficies blancas como la nieve, el hielo o las nubes, mientras que 0 indica ausencia de vegetación (Gutiérrez et al., 2011).

Holben (1986) encontró valores de NDVI de vegetación densa y suelo desnudo de 0,7 y 0,025 respectivamente. Mientras que Szymula (2014) para una serie de ocho años (2001 - 2008), observó valores promedios de 0,5 con un DE de 0,09 para pastizales nativos del noroeste argentino. En el caso de Uruguay, los valores mensuales típicos de NDVI para pasturas naturales en crecimiento saludable son de alrededor de 0,60 a 0,65, mientras que valores más bajos durante inviernos secos son de 0,50 a 0,55, y en años con sequías bajan hasta 0,17 (Banco Mundial, 2013). Lara y Gandini (2016) encontraron para pasturas sembradas con predominancia de especies como *Festuca* sp., *Agropyron* sp. y en menor medida, *Lotus* sp. y *Trifolium* sp. de la pampa deprimida valores promedios de NDVI de 0,75.

El NDVI es afectado por factores medioambientales como la cantidad disponible de nutrientes, la humedad del suelo, la salinidad y la etapa fisiológica en que se encuentra la planta (Ma et al., 2001). Las mediciones satelitales del NDVI se ven influenciadas por varios factores que no tienen relación con la vegetación, como las condiciones atmosféricas (ejemplo, nubes, aerosoles y vapor de agua), la geometría y calibración satelital (ángulos de visión y solares), así como, por el tipo de suelo y la cobertura de los cultivos (Holben 1986, Soufflet et al. 1991, Justice et al. 1991). Estos problemas pueden evitarse al medir el NDVI con este tipo de sensor portátil, el cual elimina los efectos de la interferencia atmosférica y la geometría satelital porque la medición se hace muy cerca de la superficie de las plantas.

2.5.1.3. Monitoreo remoto de animales a través del sensor MOONITOR®

Actualmente y debido al desarrollo de los SIG, ha sido posible el estudio de la distribución espacial de los animales en pastoreo mediante tecnología GPS (Barbari et al., 2006). Esta distribución espacial implica un uso heterogéneo de los pastizales (Golluscio et al., 1998) y el uso de esta tecnología en el monitoreo de animales permite disponer de datos de interés, en tiempo real, proporcionando información sobre los desplazamientos, territorio frecuentado, pautas de comportamiento, etc. (Lomillos et al., 2016). Trabajos como los de Schlecht et al. (2004), Sickel et al. (2004), Ungar et al. (2005) evaluaron estas variables en ganado vacuno.

Los collares MOONITOR® que se muestran en la figura No. 4, permiten estimar las actividades de pastoreo, descanso (incluido el tiempo de rumia) y caminata cada 4 segundos y la posición geográfica con una precisión de 2,5 m en animales a intervalos de 5 minutos. Estos collares utilizan acelerómetros de tres ejes de salida calculados como la suma de cuadrados y tres umbrales para determinar las variables antes mencionadas. Las actividades de pastoreo, descanso y caminata se determinan mediante un microcontrolador de baja potencia y un algoritmo espacial para el análisis de las señales del acelerómetro

(Brosh et al., 2018). Los datos se transmiten por satélite, se analizan en el servidor de MOONitor y llegan al usuario a través de la nube. Para fines de investigación, los collares guardan actividades y ubicaciones a lo largo del día (Brosh et al., 2018).

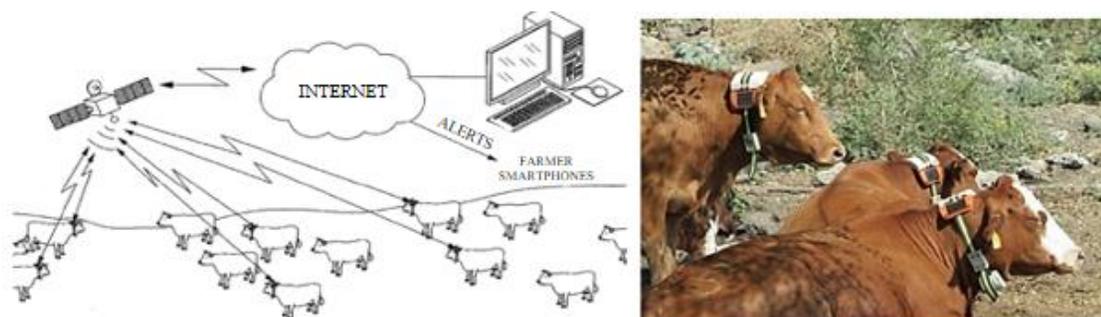


Figura No. 4. Collares MOONITOR®

2.6. SÍNTESIS

Debido a la compleja combinación de suelos, atributos de terreno y prácticas de manejo, es usual observar una alta variabilidad espacial en las propiedades del suelo, así como en atributos relacionados a la producción vegetal. El concepto “agricultura de precisión” como ya ha sido definido dentro de este trabajo, implica el uso de información acerca de la variabilidad presente en el terreno, de manera de delinear zonas y prácticas agronómicas adecuadas a las mismas.

En los últimos años los avances en tecnologías asociadas a la AP han permitido obtener grandes cantidades de información georreferenciada, incorporarla a análisis estadísticos y contribuir a mejorar el resultado físico, económico y ambiental de los sistemas productivos. Sin embargo, en la mayoría de los casos estas tecnologías han sido evaluadas y desarrolladas en sistemas agrícolas intensivos, prestándole poca atención a los sistemas pastoriles.

A nivel nacional son escasos los trabajos en que se han estudiado la variabilidad espacial de propiedades o factores determinantes de la producción en los agroecosistemas, aún más, cuando se trata de sistemas ganaderos donde los recursos forrajeros juegan un rol fundamental en la producción de carne. Por lo tanto, la generación de contenido empírico y metodologías claras que permitan comprender de mejor forma como se distribuye en el espacio la masa de forraje, así como las distintas propiedades físico-químicas del suelo, permitirían hacer un manejo por ambiente y contribuirían al desarrollo de una GP, mejorando la sustentabilidad al largo plazo de los sistemas ganaderos.

2.7. HIPÓTESIS

1. Existe variabilidad espacial en propiedades físico-químicas del suelo y en la biomasa de forraje en pasturas monoespecíficas y de manejo homogéneo.

2. La variabilidad espacial del forraje disponible es mayor en parcelas de alta respecto a las de baja disponibilidad.
3. La distribución espacial del forraje disponible se correlaciona con la variación espacial de propiedades físico-químicas del suelo.
4. La disponibilidad de forraje condiciona la frecuencia de visita del animal a una determinada zona.
5. La variabilidad espacial del forraje remanente es mayor al del forraje disponible como resultado del pastoreo animal.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN, CARACTERIZACIÓN EDÁFICA Y PERÍODO EXPERIMENTAL

El estudio a escala de potrero se llevó a cabo en la Estación Experimental del Este - Unidad Experimental “Palo a Pique” (UEPP) del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), ubicado en la ruta nacional No. 19 del departamento de Treinta y Tres - Uruguay (33°:15'36''S, 54°:29'26''W), durante el período comprendido entre el 3 de setiembre al 15 de octubre del año 2018.

Los suelos dominantes en la UEPP ubicada sobre la unidad Alférez consisten en Argisoles subéutricos melánicos abrupticos y Planosoles subéutricos melánicos/ócricos clasificados como de clase III por su capacidad de uso y manejo (Cantou y Terra, 2012). Se trata de suelos con relieve suavemente ondulado, de buena fertilidad, pero con algunos problemas de drenaje interno (Carámbula et al., 1997). Algunas de las principales características edáficas del sitio experimental se muestran en el cuadro No. 9.

Cuadro No. 9. Características edáficas en los primeros 15 cm del suelo para la UEPP

Variable	Unidad	Valores
Textura	-	Franco a franco limosa
COS total	(%)	1,9
N total	(%)	0,2
P-cítrico	($\mu\text{g P.g}^{-1}$)	4
K	(meq.100g^{-1})	0,2
Ca	(meq.100g^{-1})	5
Mg	(meq.100g^{-1})	2,6
Na	(meq.100g^{-1})	0,3
pH	-	5 -5,5
CIC	(meq.100g^{-1})	13 - 18
Saturación de bases (SB)	(%)	84 - 100

Fuente: elaborado en base a Quincke et al. (2019).

3.2. ANTECEDENTES

Los muestreos se realizaron sobre un experimento de larga duración ya instalado. El mismo consistió en un diseño de bloques al azar con 4 repeticiones y 5 tratamientos con un tamaño de la unidad experimental de 1,2 ha. Los tratamientos correspondieron a distintos cultivares de la especie *Festuca arundinacea* que al momento del muestreo se encontraban en su 5°. año productivo.

La siembra de los distintos cultivares de festuca se realizó en otoño de 2013 con siembra directa a una densidad de $13 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. La fertilización basal consistió en $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de NPK (15-15-15), repitiéndose la dosis en los otoños 2014 y 2016. En el año 2015 se aplicó $100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de fosforita natural (0-10/29-0). A partir de la primavera de 2013 y de forma estacional, se aplicaron $100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de urea (46-0-0).

Los pastoreos se basaron en un sistema rotativo con tiempos de ocupación de 10 días y descansos fijos de 30 días, con 7 novillos de 15 meses de edad al inicio del experimento, los cuales permanecían un año en el ensayo, siendo posteriormente reemplazados por animales de iguales características iniciales. Cada lote de animales pastoreó únicamente cada uno de los tratamientos evaluados. En función de la disponibilidad de forraje se incorporaron o retiraron animales volantes a lo largo del año, a los efectos de mantener un remanente entorno a los 10-12 cm.

3.3. CONDICIONES CLIMÁTICAS PREVIAS Y DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO

Para caracterizar las condiciones previas y durante el estudio se tomaron los valores de precipitaciones efectivas y temperatura del aire correspondientes al período comprendido entre el 4 de agosto al 15 de octubre. Estos valores fueron tomados de la estación meteorológica de la Estación Experimental del Este - Unidad Experimental “Palo a Pique” (UEPP) INIA Treinta y Tres. Los valores diarios de cada variable se compararon con los datos promedios de una serie histórica de 9 años (2009-2017) correspondientes al mismo período.

3.4. DISEÑO EXPERIMENTAL

3.4.1. Diseño de la grilla de muestreo

De los 5 tratamientos del experimento original se seleccionaron las parcelas correspondientes al cultivar INIA Fortuna con y sin inoculación del endófito AR584 (Fo+ y Fo respectivamente). Con el fin de estudiar la variabilidad entre y dentro de las parcelas, el efecto bloque se descartó del análisis y el efecto tratamiento no fue considerado. Pereyra (2019) reportó que en el experimento la oferta de forraje, producción de materia seca, así como las tasas de crecimiento, no se diferenciaron estadísticamente debido a la inclusión o no del endófito.

En la figura No. 5 se presenta el diseño de la grilla de muestreo, donde se observa que sobre cada una de las parcelas se instalaron 3 grillas, con dimensiones de $50\cdot 50 \text{ m}$ (identificadas como grillas) y subdivididas en rectángulos más pequeños de $10\cdot 16,6 \text{ m}$ (unidad de muestreo) dando un total de 360 unidades de muestreo. Vale aclarar que al momento de la toma de muestras la grilla número 5 ubicada en la parcela 2 se encontró anegada y por lo tanto se eliminó del ensayo, dando así un nuevo total de 345 unidades de muestreo.

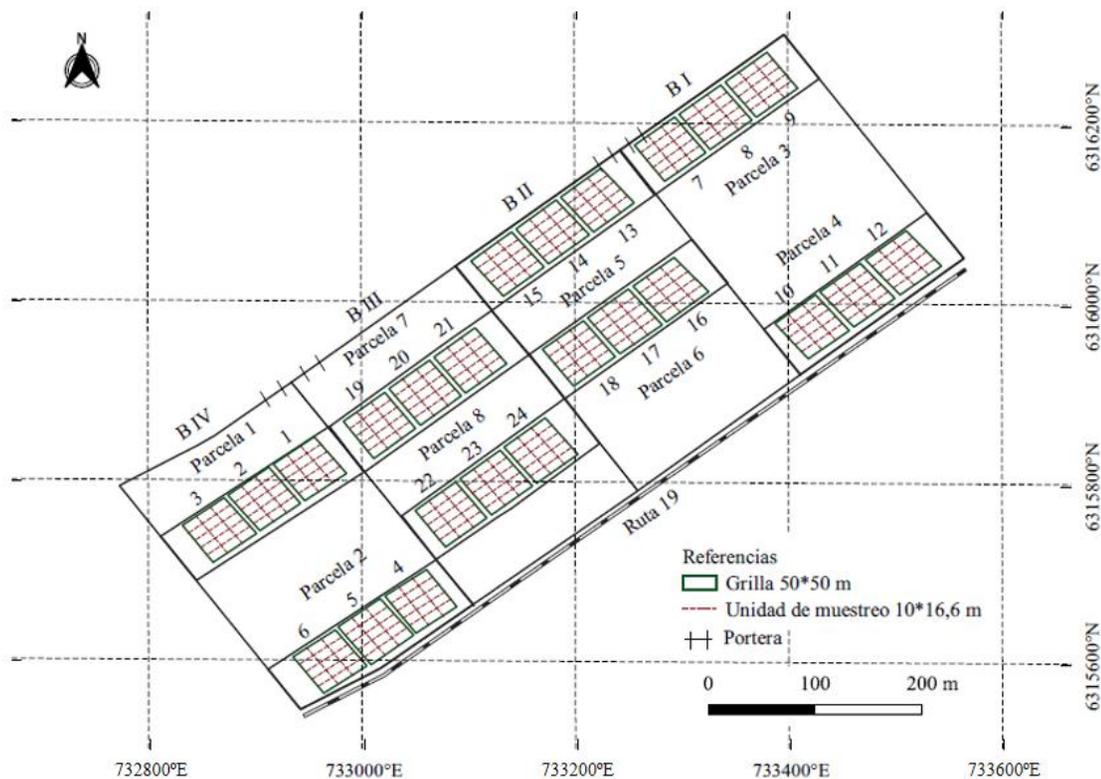


Figura No. 5. Diseño de la grilla de muestreo

Las muestras de suelo y de forraje fueron tomadas de forma sistematizada partiendo desde la portera y el extremo superior de la grilla como se observa en la figura No. 6. Las primeras consistían en muestras compuestas de 10 sub-muestras de cada unidad de muestreo, mientras que las segundas correspondían al centro de cada una de éstas. Cada muestra fue georreferenciada con un GPS Garmin eTrex Venture® HC. Durante el período de estudio las parcelas recibieron una fertilización de $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de urea (46-0-0).

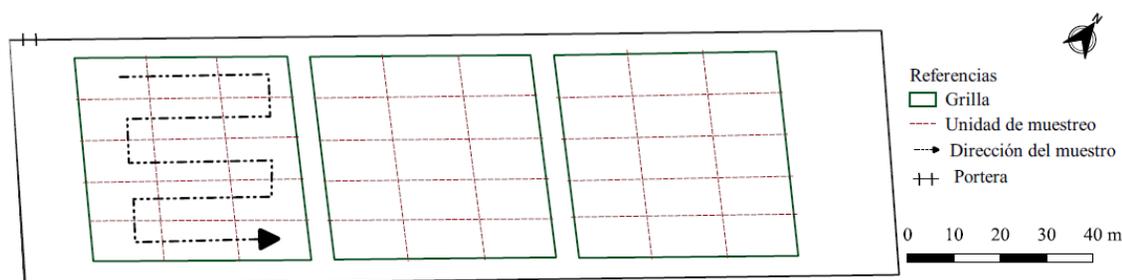


Figura No. 6. Dirección de la toma de muestras de forraje y suelo

3.4.2. Caracterización del lote de animales y estrategia de pastoreo

El diseño original del pastoreo se basó en la utilización de 7 novillos cruza Aberdeen Angus por parcela, además, debido al exceso de forraje la carga se ajustó mediante animales volantes. Al inicio del estudio el lote de animales por parcela estaba compuesto por 17 animales de sobre año, 7 correspondientes al experimento original (364 kg peso vivo promedio) y 10 que ingresaron como volantes (464 kg peso vivo promedio). Posteriormente el 25 de setiembre ingresaron otros 4 animales con un peso vivo promedio de 442 kg. Como se mencionó en el apartado de antecedentes el pastoreo fue rotativo, donde los animales permanecieron 10 días en cada parcela, pasando luego al siguiente bloque de manera tal que cada lote continuara en cada tratamiento asignado del experimento original dando un total de 40 días por ciclo de pastoreo.

3.5. DETERMINACIONES

3.5.1. Determinaciones sobre la pastura

3.5.1.1. Altura, cantidad de forraje y composición botánica

En cada unidad de muestreo se utilizaron cuadros de 20*50 cm para determinar, altura con regla graduada mediante 4 puntos al azar considerando el horizonte de mayor densidad de forraje (Berretta, 2008) y cantidad de forraje previo al ingreso de los animales e inmediatamente posterior a su salida cortando al ras del suelo con tijera eléctrica. Posteriormente en el laboratorio se definió la composición botánica por apreciación visual separando entre proporción de festuca y otros. Una vez acondicionadas las muestras se pesaron utilizando una balanza de precisión y se obtuvo el peso fresco, posteriormente se secaron a estufa de aire forzado a 60°C durante 48 horas para determinar la materia seca y poder obtener la biomasa disponible (BD) y biomasa remanente (BR) en toneladas MS.ha⁻¹.

3.5.1.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Este índice se determinó utilizando un sensor óptico portátil GreenSeeker™, situándolo a una altura aproximada de un metro sobre cada uno de los cuadros de 20*50 cm de las muestras de BD y BR.

3.5.1.3. Calidad de la biomasa disponible

Las muestras de forraje fueron unificadas tomando de a tres unidades de muestreo en dirección suroeste a noreste dentro de cada grilla como se observa en la figura No. 7. Se obtuvieron un total de 115 muestras, las cuales fueron molidas mediante un picador THOMAS SCIENTIFIC™ utilizando una malla de 1 mm y enviadas al Laboratorio de Nutrición de INIA-La Estanzuela para determinar el tenor de proteína cruda (PC), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA) y cenizas por la tecnología NIRS.

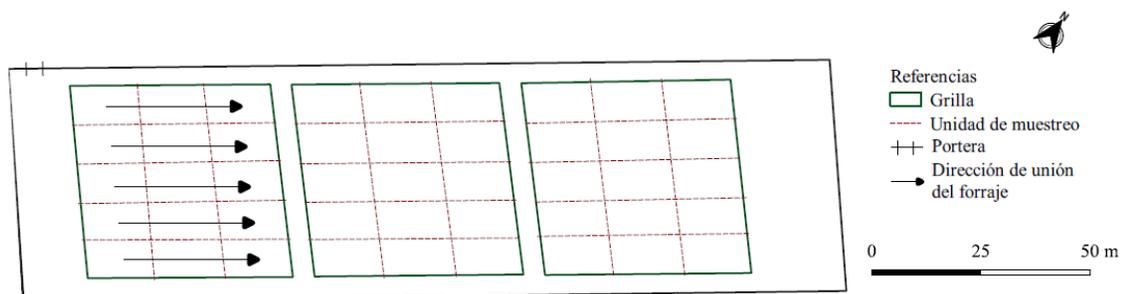


Figura No. 7. Dirección de unión de las muestras de forraje para evaluar calidad

3.5.2. Determinaciones en el suelo

Se extrajeron muestras de suelo compuestas por 10 sub-muestras de 0-15 cm de profundidad en cada unidad de muestreo, dando un total de 360 muestras, de las cuales se seleccionaron al azar 2 por grilla obteniéndose un total de 48 muestras que fueron enviadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Agua de INIA-La Estanzuela.

Los análisis realizados fueron, carbono orgánico del suelo como porcentaje (CO total %), nitrógeno total como porcentaje (N total %), fósforo como P-cítrico ($\mu\text{g P.g}^{-1}$), potasio, calcio, magnesio y sodio (meq.100g^{-1}), pH, textura, capacidad de intercambio catiónico como CIC a pH₇ (meq.100g^{-1}), acidez titulable (meq.100g^{-1}), bases totales (meq.100g^{-1}) y saturación de bases como porcentaje de la CIC (SB %).

Además, en cada parcela experimental se determinó la CEa en mS.m^{-1} a una profundidad de 0-30 cm utilizando el sensor VERIS 3100[®]. El mismo fue remolcado por una camioneta pick-up 4x4 a una velocidad de desplazamiento promedio de 15 km.h^{-1} y dejando una separación de 10 m entre transectas, logrando así pasar por cada unidad de muestreo y no superar la distancia de 20 m entre cada una de ellas, evitando de esta forma errores de medición y pérdida de información, lo que genera menor eficiencia en la predicción de los valores en las regiones no muestreadas (Farahani y Flynn, 2007). El sensor VERIS 3100[®] trabaja con un GPS acoplado y de esta forma georreferencia las observaciones.

3.5.3. Determinaciones sobre los animales

Se seleccionaron 4 animales por grupo según similitud de peso vivo a los cuales se les colocaron durante un período de 40 días collares MOONITOR[®]. Sobre los mismos se determinó la ubicación geográfica durante la actividad de pastoreo con el objetivo de evaluar las relaciones entre el territorio frecuentado y la cantidad y calidad de la BD en cada una de las unidades de muestreo.

Con el fin de descartar anomalías en el comportamiento de los animales, así como problemas asociados al suministro de energía del GPS, los datos de los días correspondientes a la colocación de los collares se eliminaron del análisis. Además,

también se descartaron los días cuyos datos no estuvieron completos al igual que valores anormales producto de la pérdida del collar por el animal. Si bien estos collares permiten conocer el tiempo dedicado al descanso y caminata (Brosh et al., 2018), estos no fueron considerados debido a que no hacen al objetivo.

3.6. ANÁLISIS DE DATOS

El análisis de los datos consideró cada componente del sistema suelo-planta-animal por separado. Para éste, se utilizó el paquete estadístico Rstudio versión 3.6.1.

3.6.1. Análisis exploratorio de los datos

3.6.1.1. Análisis estadístico descriptivo

Para cada una de las variables asociadas a la pastura y el suelo se determinó el valor mínimo, máximo, media, DE y CV considerando todo el conjunto de observaciones.

3.6.1.2. Análisis de correlación de Pearson

Con los datos relevados en cada unidad de muestreo se calcularon por separado los coeficientes de correlación de Pearson entre variables de la pastura, entre propiedades del suelo y entre la biomasa disponible de festuca (BDf) y éstas últimas.

3.6.1.3. Análisis de igualdad de varianza (ANAVA)

Con el fin de contrastar las medias entre parcelas se llevó a cabo un ANAVA para la BDf y aquellas propiedades del suelo que mostraron estar correlacionadas significativamente con ésta. A su vez, se calculó el CV asociado a cada variable como forma de comparar la variabilidad entre parcelas.

Modelo de ANAVA empleado para evaluar el efecto de la parcela en la cantidad de BDf y el contenido de algunas propiedades del suelo:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \varepsilon_i \text{ IID} \sim N(0, \sigma^2)$$

i: 1, 2, 3, ..., 8

j: 1, 2, 3, ..., 45

Dónde,

- Y_{ij} : variable de respuesta.
- μ : media general.
- τ_i : efecto de la i-ésima parcela.
- ε_{ij} : error experimental asociado a cada observación.

3.6.2. Análisis de la estructura espacial y predicción mediante kriging

Este análisis se llevó a cabo para las variables Bdf y las propiedades del suelo correlacionadas significativamente con ésta. Previamente se procedió a comprobar los supuestos de normalidad y estacionaridad. Teniendo en cuenta que una distribución de frecuencias es simétrica y está próxima a la normalidad cuando el coeficiente de asimetría es inferior a 1 (Paz-González et al., 1996), se llevó a cabo el cálculo del mismo, así como el histograma de frecuencia con su respectiva curva normal. El supuesto de estacionaridad se comprobó mediante la construcción de un diagrama de dispersión tomando como eje de las abscisas cada coordenada geográfica (X y Y) y en el eje de las ordenadas la variable cuantitativa de estudio. Según Giraldo (2003), una detección de tendencia en el gráfico de dispersión puede ser una muestra de que no se satisface dicho supuesto.

Una vez construido el semivarioograma experimental se ajustó de forma visual uno de los posibles modelos teóricos. Por último, se validó el modelo mediante validación cruzada y se calculó el error medio (EM), error cuadrático medio (ECM), error cuadrático medio normalizado (ECMN) y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{Aj}) entre los valores observados vs. los predichos, con el fin de determinar la calidad predictiva del modelo ajustado.

Posteriormente a que se ajustara un modelo de dependencia espacial, se realizó la interpolación de los datos y así predecir los valores de la variable en puntos no muestreados y obtener mapas 2D que permiten visualizar la distribución espacial de cada variable en el terreno e identificar zonas homogéneas a las cuales se le podría realizar un manejo sitio específico.

3.6.3. Análisis espacial de la actividad de pastoreo

Con el fin de evaluar la relación entre la Bdf con la frecuencia de visita realizada por los animales en pastoreo, se formaron 6 categorías en $\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ de Bdf (≤ 1000 , 1001-2000, 2001-3000, 3001-4000, 4001-5000 y ≥ 5001). Mediante un ANAVA se buscó contrastar las frecuencias de visita obtenidas entre cada una de las categorías. Además, se evaluó si las distintas categorías de Bdf generaron cambios en los contenidos de PC, FDN, FDA y cenizas.

Como resultado del diseño del experimento original se debió realizar 2 ANAVA, debido a que cada lote de animales solo tenía acceso a aquellas parcelas correspondientes al tratamiento Fortuna con endófito o a las del tratamiento Fortuna sin endófito (Fo+ y Fo respectivamente). Adicionalmente y como forma de evaluar el cambio en la variabilidad de la cantidad de forraje post pastoreo se llevó a cabo el cálculo del CV para cada parcela.

Modelo de ANAVA empleado para evaluar el efecto de la categoría de BDf en la frecuencia de pastoreo:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \varepsilon_i \text{ IID } \sim N(0, \sigma^2)$$

i: 1, 2, 3, ..., 6

j: 1, 2, 3, 4

Dónde,

- Y_{ij} : variable de respuesta (%)
- μ : media general
- τ_i : efecto de la i-ésima categoría de BDf
- ε_{ij} : error experimental asociado a cada observación

Modelo de ANAVA empleado para evaluar el efecto de la categoría de BDf en los parámetros de calidad:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \varepsilon_i \text{ IID } \sim N(0, \sigma^2)$$

i: 1, 2, 3, ..., 6

j: 1, 2, ..., 115

Dónde,

- Y_{ij} : variable de respuesta (%)
- μ : media general
- τ_i : efecto de la i-ésima categoría de BDf
- ε_{ij} : error experimental asociado a cada observación

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

Durante el período comprendido entre el 4 de agosto al 15 de octubre, las precipitaciones efectivas sumaron un total de 249 mm, un 4,4 % inferior en relación al mismo período de la serie histórica. Pevio al inicio del muestreo (del 4 de agosto al 3 de setiembre del 2018) se registraron 107 mm, un 9 % superior al ocurrido durante los años de la serie histórica, mientras que lo contrario sucedió al observar las precipitaciones efectivas acumuladas durante el período en el que se tomaron las muestras (141 mm para el período de estudio vs. 161 mm para la serie histórica). Sin embargo, no fue similar la distribución de las precipitaciones como se observa en la figura No. 8.

La temperatura promedio registrada para todo el período analizado no difirió con respecto al histórico. Existieron 31 días donde la temperatura se ubicó por encima de la media histórica y 42 días por debajo (figura No. 8).

Cuando se analiza cada período por separado en relación a la serie histórica se observa que tampoco se registraron diferencias en temperatura media durante los días en los cuales se llevaron a cabo los muestreos, pero si para los días previos al muestreo (11,6°C período de estudio vs. 13,1°C histórico). En base a lo anterior, se considera que tanto en el período previo como en el de muestreo, las precipitaciones efectivas y las temperaturas se comportaron muy similar al promedio histórico, lo que lleva a caracterizar el período de estudio como promedio.

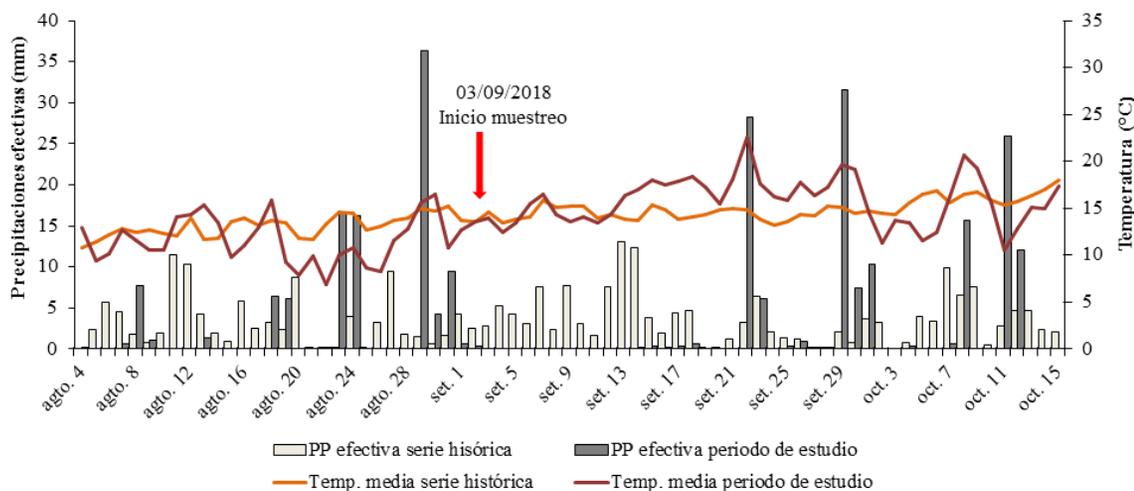


Figura No. 8. Condiciones climáticas previo y durante el período de estudio

4.2. RESULTADOS SOBRE LA PASTURA

4.2.1. Estadística descriptiva y análisis de correlación lineal para los atributos medidos sobre la pastura

En el cuadro No. 10 se presentan los estadísticos asociados a cada variable medida sobre la pastura pre y post pastoreo, donde se observa una gran similitud entre los promedios de MS total y MS festuca tanto en la biomasa disponible como remanente, como producto del elevado porcentaje de festuca en ambos casos. Considerando que se trata de una pastura monoespecífica de quinto año se destacan estos altos valores promedios en la proporción de esta gramínea, estos valores superiores al 80 % se alejan de la realidad productiva donde en general las pasturas perennes se degradan con más de 4 años (García et al., 1981) y muestran el potencial alcanzable por la especie.

Cuadro No. 10. Estadísticos descriptivos asociados a cada variable medida sobre la pastura pre y post pastoreo

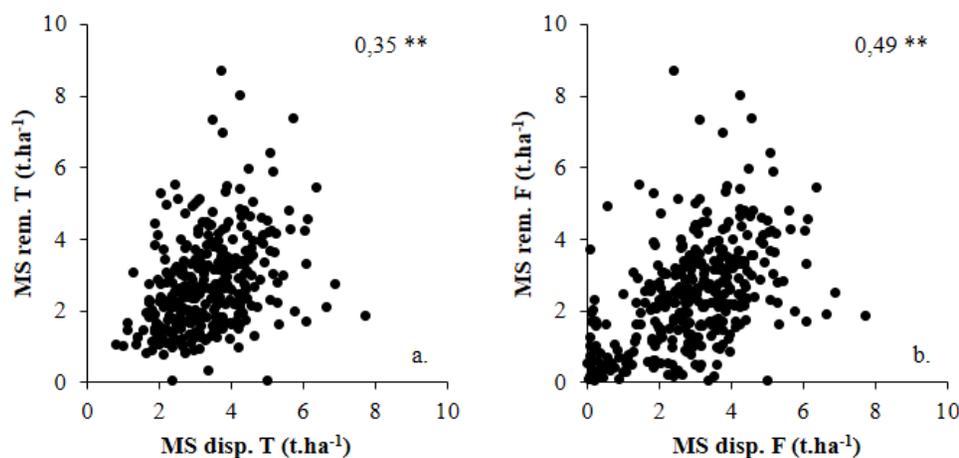
Variable	Unidad	n	Media	Rango	DE	CV (%)
Biomasa disponible						
MS total	(tMS.ha ⁻¹)	344	3,39	0,83 - 7,77	1,09	32
MS festuca	(tMS.ha ⁻¹)	344	2,98	0,04 - 7,77	1,47	49
Prop. festuca	(%)	344	84	5 - 100	28	34
Altura	(cm)	344	27	6 - 47	8	30
NVDI	-	344	0,86	0,55 - 0,91	0,03	4
PC	(%)	115	19	15 - 24	2,02	10
FDN	(%)	115	55	50 - 60	2,44	4
FDA	(%)	115	32	28 - 35	1,7	5
Cenizas	(%)	115	11	9 - 12	0,55	5
Biomasa remanente						
MS total	(tMS.ha ⁻¹)	343	2,72	0,31 - 8,67	1,29	47
MS festuca	(tMS.ha ⁻¹)	343	2,43	0,0 - 8,67	1,49	62
Prop. festuca	(%)	343	85	0 - 100	27	32
Altura	(cm)	344	13	4 - 32	5,03	39
NDVI	-	343	0,71	0,44 - 0,85	0,08	11

En cuanto a la variabilidad observada a través del CV, la MS festuca en ambos momentos fue la que mostró una mayor dispersión respecto a la media, presentando más variabilidad a la salida de los animales (62 %) que previo a su ingreso (49 %). Al comparar la altura del forraje pre y post pastoreo se observa que ésta disminuyó 14 cm, mientras que la variabilidad aumentó (30 % vs. 39 %). Lo mismo ocurrió con el NDVI, donde el valor medio disminuyó (0,86 vs. 0,71), mientras que la variabilidad aumentó (4 % vs. 11 %).

Sin embargo, a diferencia de lo anterior la proporción de festuca (84 % vs. 85 %), así como su variabilidad (34 % vs. 32 %) no se modificó.

Por otro lado, más allá de la alta variabilidad que mostró la MS disponible total (32 %), la calidad de ésta medida a través de los porcentajes de PC, FDN, FDA y cenizas presentó poca variabilidad (10 %, 4 %, 5 % y 5 % respectivamente).

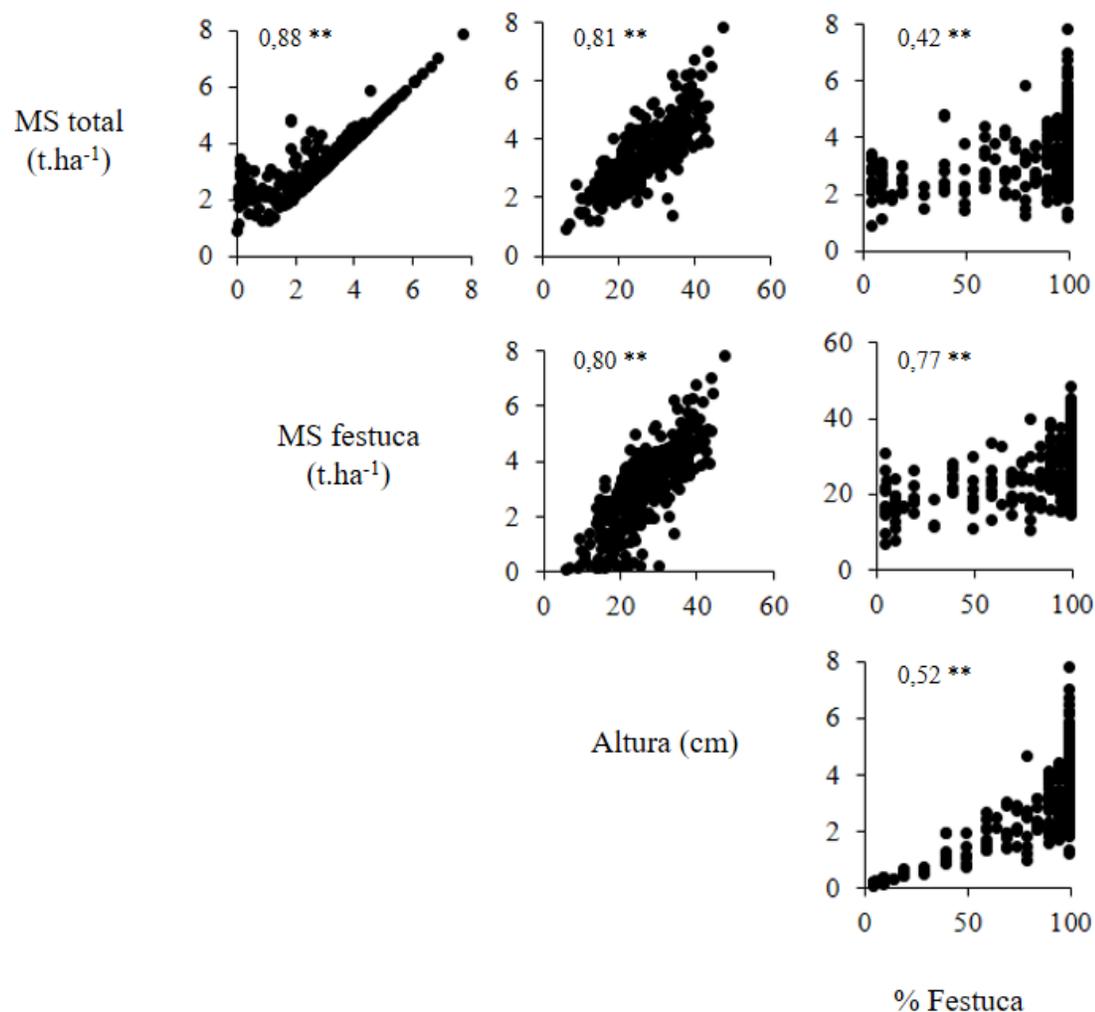
La figura No. 9 muestra las correlaciones lineales halladas entre la cantidad de MS previo al ingreso de los animales e inmediatamente posterior a su salida, tanto para la MS total, como para la MS festuca. En ambos casos se encontraron correlaciones positivas y altamente significativas (p -valor $\leq 0,01$).



Los números dentro de las gráficas equivalen al coeficiente de correlación, ** = p -valor $\leq 0,01$

Figura No. 9. Correlación de Pearson entre la materia seca pre y post pastoreo

La figura No. 10 presenta los coeficientes de correlación de Pearson vinculando los atributos de la BD, mientras que la figura No. 11 muestra los de la BR, únicamente para las relaciones que resultaron significativas (p -valor $\leq 0,05$). Del total de atributos, solo para NVDI medido sobre la BD no se encontraron correlaciones significativas (anexo No. 1) dado a que este índice se satura a valores mayores de 0,80 (Pérez, 2018). Por lo contrario, en el resto de los casos las correlaciones resultaron ser altamente significativas (p -valor $\leq 0,01$).



Los números dentro de las gráficas equivalen al coeficiente de correlación, ** = p-valor $\leq 0,01$

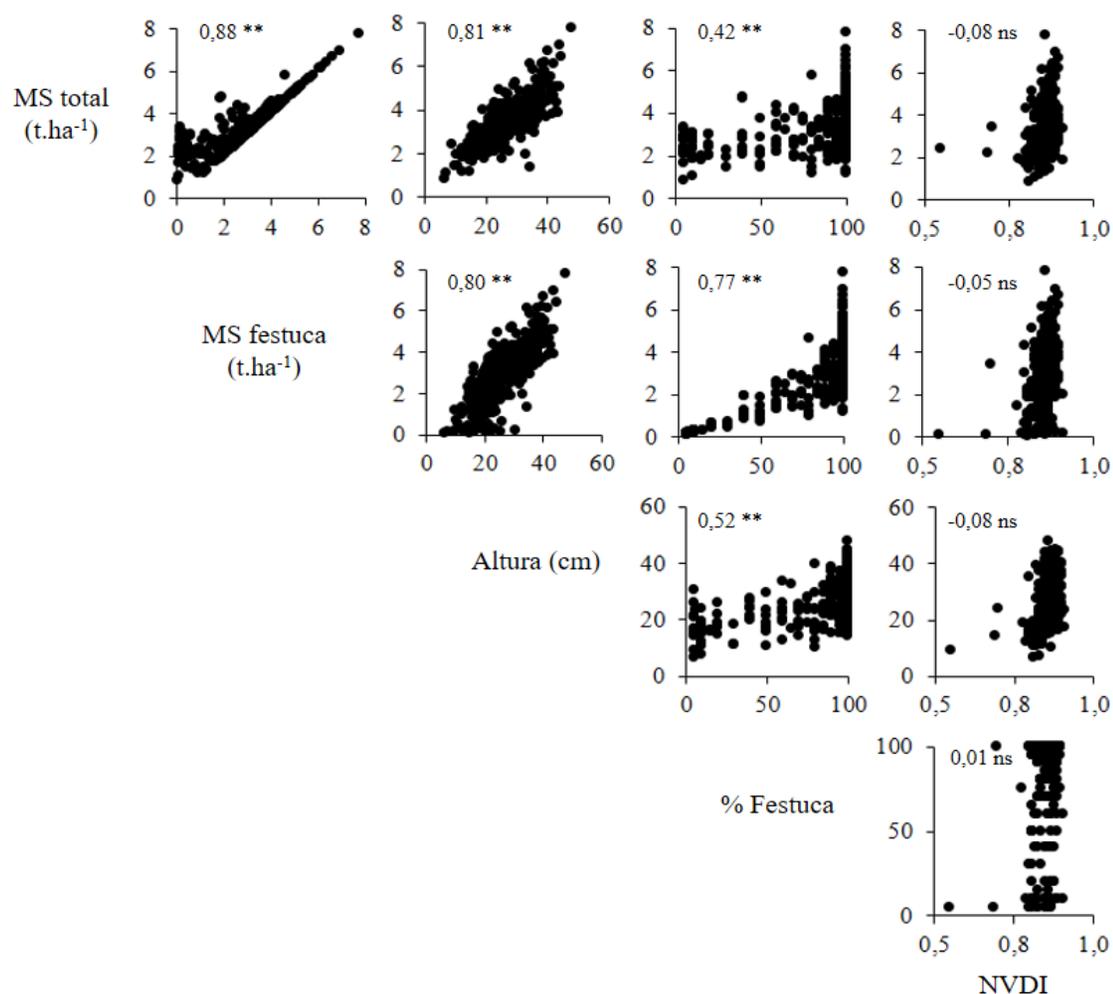
Figura No. 10. Matriz de correlación de Pearson entre las variables de la biomasa disponible

Los resultados de la correlación entre los atributos de la BD muestran que la relación más fuerte se dió entre la MS total y MS festuca (0,88), destacándose que a valores menores de MS la dispersión entorno a la recta 1:1 aumenta, debido a que los valores bajos de porcentaje de festuca se asocian mayoritariamente a menores valores de MS total. A su vez, se encontraron relaciones fuertes y positivas entre MS total y altura (0,81), MS festuca y altura (0,80) y entre MS festuca y % festuca (0,77), mientras que las más débiles ocurrieron entre altura y % festuca (0,52) y MS total y % festuca (0,42).

A su vez, las correlaciones encontradas entre la MS festuca de la BD y los distintos parámetros de calidad (PC, FDA, FDN y cenizas) resultaron ser altamente significativas (p-valor $\leq 0,01$) a excepción del % de ceniza el cual no se correlacionó

significativamente para un p -valor $\leq 0,05$ (anexo No. 2). PC se correlacionó negativamente (-0,30), mientras que FDA y FDN lo hicieron de forma positiva (0,42 y 0,66 respectivamente). En cuanto a las relaciones halladas entre estos parámetros, PC se correlacionó de forma negativa y altamente significativa tanto con FDA (-0,75) como con FDN (-0,59), pero positiva y de igual significancia con el % de ceniza (0,48). Por otro lado, FDN y FDA mostraron una correlación débil y no significativa con el % de ceniza, mientras que entre ellas muestran una relación lineal positiva y altamente significativa igual a 0,81 (anexo No. 2).

En la figura No. 11 se muestran las correlaciones entre los atributos de la BR. Al contrario de lo observado en la BD, el NVDI tuvo correlaciones altamente significativas con altura (0,62), MS festuca (0,46), % festuca (0,43) y MS total (0,40).



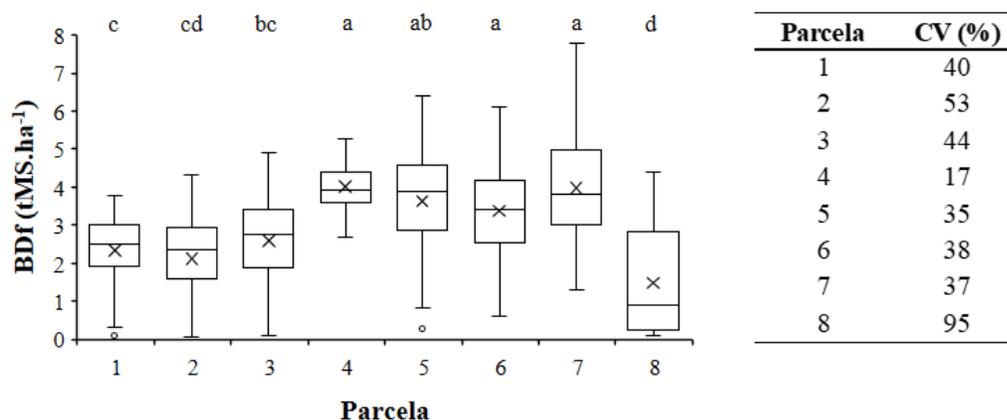
Los números dentro de las gráficas equivalen al coeficiente de correlación, ** = p -valor $\leq 0,01$

Figura No. 11. Matriz de correlación de Pearson entre las variables de la biomasa remanente

Por otro lado, al igual que en la BD la correlación más fuerte se da entre la MS total y MS festuca (0,91). El resto de las correlaciones si bien fueron altamente significativas, sus respectivos coeficientes de correlación fueron menores que los observados en la BD. La MS total y MS festuca se correlacionaron de forma positiva con altura (0,67 y 0,68) y % festuca (0,35 y 0,66), al igual que estas dos últimas entre sí (0,44).

4.2.2. Comparación de medias y CV

La figura No. 12 presenta de forma comparativa los box plot y CV para la Bdf correspondientes a cada parcela. La parcela 4 fue la que mostró mayor valor promedio en $tMS \cdot ha^{-1}$ diferenciándose estadísticamente de las parcelas 1, 2, 3 y 8, a su vez fue la que presentó menor variabilidad en términos del CV. Por otro lado, la parcela 8 fue la de mayor CV, como también la de menor cantidad de Bdf previo al ingreso de los animales, siendo diferente estadísticamente de todas las parcelas a excepción de la 2.



Letras diferentes indican medias estadísticamente distintas (p -valor $\leq 0,05$)

Figura No. 12. Gráfico box plot para biomasa disponible de festuca según parcela

4.2.3. Análisis de estructura espacial y predicción mediante kriging de la Bdf

En el anexo No. 3 se presenta el gráfico de distribución de frecuencia con el coeficiente de asimetría para la Bdf, así como los gráficos de dispersión de los valores de $tMS \cdot ha^{-1}$ según las coordenadas X y Y. La distribución de frecuencia de los valores de Bdf se ajustaron a la de una curva normal y mostraron un coeficiente de asimetría menor a 1, por lo que se acepta el cumplimiento del supuesto de normalidad. Además, los gráficos de dispersión no mostraron tendencia y en consecuencia se asume que el supuesto de estacionaridad se cumple.

El modelo teórico que mejor ajustó para la Bdf fue el exponencial, con un rango (h) de autocorrelación espacial de 63 m, un nugget (C_0) de $0,69 tMS \cdot ha^{-1}$ y un sill (C_1) de $2,41 tMS \cdot ha^{-1}$, dando como resultado una dependencia espacial moderada de la variable,

debido a que la relación nugget/sill se encuentra entre el 25 al 75 % (cuadro No. 11 y figura No. 13).

Cuadro No. 11. Modelo de autocorrelación espacial ajustado y sus componentes para la Bdf

Bdf (ttMS.ha⁻¹)	
Modelo	Exponencial
Nugget (tMS.ha ⁻¹)	0,69
Sill (tMS.ha ⁻¹)	2,41
Rango (m)	63,15
Nugget/sill*100 (%)	29
Dependencia espacial	Moderada

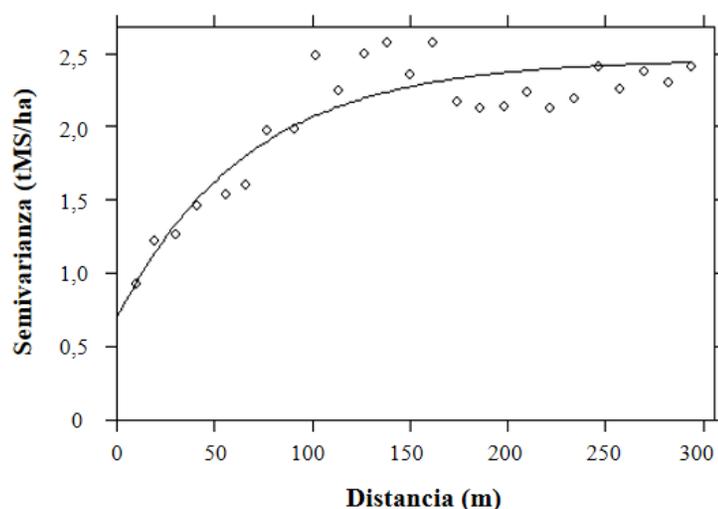


Figura No. 13. Semivariograma experimental y teórico para la Bdf

El resultado de la validación cruzada para el modelo de semivariograma de la Bdf se presenta en el cuadro No. 12, el coeficiente de determinación entre los valores observados y los predichos sugiere, que el modelo ajustado logra predecir con éxito los valores de Bdf en sitios que no fueron muestreados en un 44% de los casos.

Cuadro No. 12. Validación cruzada para el modelo de semivariograma ajustado para Bdf

Variable	Modelo	R²_{Aj} (%)
Bdf (tMS.ha ⁻¹)	Y= 0,068 + 0,978X	44

De acuerdo al resultado resultado arrojado por la validación, el modelo de semivariograma obtenido para la Bdf no es útil para predecir la variable en aquellos

puntos no muestreados, ya que la bondad de ajuste no fue satisfactoria. Aun así, la interpolación mediante kriging que se presenta en la figura No. 14 muestra el patrón de distribución de la MS de festuca dentro del área muestreada.

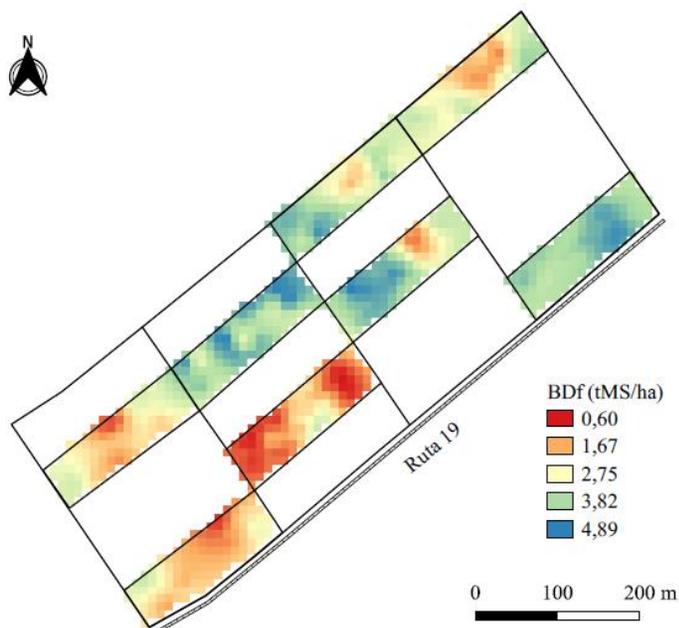


Figura No. 14. Kriging de la BDF

4.3. RESULTADOS SOBRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO

4.3.1. Estadística descriptiva para los atributos medidos sobre el suelo

En el cuadro No. 13 se encuentran las medidas de resumen para las 16 variables edáficas determinadas. Según el análisis de granulometría los suelos tuvieron un contenido medio de arena mayor a 40% y menor a 30% de arcilla y limo, por lo que éstos se clasifican como de textura franco arcillo arenoso a franco arcilloso (Rucks et al., 2004).

Cuadro No. 13. Estadísticos descriptivos asociados a cada variable medida sobre el suelo

Variable	Unidad	n	Media	Rango	DE	CV (%)
CO total	(%)	48	1,80	1,11 - 2,54	0,38	21
N total	(%)	48	0,18	0,11 - 0,25	0,04	22
P cítrico	($\mu\text{g P.g}^{-1}$)	48	11,75	6,28 - 20,03	3,10	26
K	(meq.100g ⁻¹)	48	0,15	0,10 - 0,30	0,05	30
Ca	(meq.100g ⁻¹)	48	4,06	2,36 - 5,65	1,24	30
Mg	(meq.100g ⁻¹)	48	1,36	0,69 - 2,12	0,38	28
Na	(meq.100g ⁻¹)	48	0,33	0,13 - 0,69	0,14	41
BT	(meq.100g ⁻¹)	48	5,90	3,56 - 9,19	1,63	28
SB	(%)	48	56,69	48,54 - 68,22	5,42	10
CICpH ₇	(meq.100g ⁻¹)	48	10,27	6,66 - 14,25	2,08	20
A tituable	(meq.100g ⁻¹)	48	4,38	3,09 - 5,81	0,66	15
pH	-	48	5,10	4,85 - 5,48	0,15	3
CEa 30cm	(mS.m ⁻¹)	344	14,45	5,73 - 47,32	6,02	42
Arena	(%)	48	43,56	23 - 64	7,97	18
Limo	(%)	48	29,50	6 - 44	10,14	34
Arcilla	(%)	48	26,94	12 - 42	10,00	37

CO total: carbono orgánico total, N total= nitrógeno total, P cítrico= fósforo cítrico, K= potasio, Ca= calcio, Mg= magnesio, Na= sodio, BT= bases totales, SB= saturación de bases, CICpH₇= capacidad de intercambio catiónico a pH₇, A tituable= acidez tituable, CEa 30cm= conductividad eléctrica aparente a 30cm.

El contenido promedio de CO total encontrado para estos suelos fue de 1,8 %. Teniendo en cuenta que la concentración de CO en la MO del suelo es aproximadamente de 58 % (Nelson y Sommers, 1982) y utilizando el factor “Van Bemmelen” de 1,72 para transformar % de CO en % de MO del suelo se tendría un contenido medio de MO del suelo equivalente a 3,10 %.

El pH osciló entre fuertemente ácido a moderadamente ácido según la clasificación propuesta por Blakemore, citado por Osorio (2003), por otro lado, la saturación de bases presentó un porcentaje mayor a 50 %, al igual que la mayoría de los suelos del país (Durán et al., 1999). El valor de CIC encontrado es similar al reportado por Durán et al. (s.f.) para la misma unidad de suelo. Este mismo autor observó valores de CIC entre 1-35,8 meq.100g⁻¹ para el horizonte A de distintos suelos del país, haciendo referencia que aquellos de textura más fina poseían valores mayores a los de textura gruesa. A lo que respecta al contenido de los tres macronutrientes esenciales N P K, el valor promedio encontrado para estos suelos fue equivalente a 1800 ppm de N total, 11,75 ppm de P cítrico y 0,15 meq.100g⁻¹ de K intercambiable.

Si se considera solo el N inorgánico (debido a que ésta es la forma en que el N es absorbido por las plantas) que según Perdomo y Barbazán (1999) representa el 2 % del

N total del suelo en forma de NO_3^- , NO_2^- y NH_4^+ , se contaría con un contenido promedio aproximado de 36 ppm de N, el cual de acuerdo a los mismos autores estaría disponible para las plantas en el corto y mediano plazo. Por otro lado, el K es el nutriente requerido en mayor cantidad por las plantas y al presentar dinámica inorgánica, su disponibilidad dependerá del material parental de suelo (Bertsch y Thomas, 1985). El trabajo presentado por Barbazán et al. (2011) el cual resume la información correspondiente a 50 experimentos de campo, indica un valor crítico orientativo de $0,34 \text{ meq.}100\text{g}^{-1}$ de suelo para K intercambiable sin discriminar por textura ni cultivo, por lo que tomando este valor de referencia se estaría en niveles de insuficiencia para este nutriente.

En relación al contenido de P el método de P cítrico es más eficiente en extraer el P ligado al Ca que el método Bray I, debido a que el cítrico evita la reprecipitación de iones fosfato con cationes Ca durante la extracción (Bracco y Hernández, 2018). De todas formas, los niveles críticos de suficiencia para este nutriente se expresan en P Bray I siendo para las gramíneas entre 8 y 10 ppm (Carámbula, 2003), por lo tanto, no se podría afirmar que el nivel de P cítrico observado satisfaga los requerimientos de la especie. Sin embargo, existen zonas donde el nivel de fósforo disponible se encuentra próximo al valor a partir del cual no hay la respuesta al agregado de este nutriente (MGA. CIAAB, 1971). Además, Sawyer y Mallarino (1999) recomiendan que la conversión de los resultados de las pruebas de un método a otro no debiera hacerse, sino que se debería usar la guía de interpretación para cada test. Aun así, Bracco y Hernández (2018) encontraron una correlación lineal entre ambos métodos de 0,94 considerando los primeros 7,5 cm de suelo, por lo que el nivel crítico de P Bray I podría tomarse como referencia para determinar el nivel de suficiencia por encima del cual el contenido de P cítrico no sería limitante.

Warrick y Nielsen (1980) propusieron límites de CV para caracterizar la variabilidad de las propiedades de suelo, donde $\text{CV} < 12 \%$, entre 12% - 60% y $> 60 \%$ se consideran como de baja, media y alta variabilidad respectivamente. Las variables de baja variabilidad fueron pH (3 %) y SB (10 %), el resto de las variables presentaron variabilidad media siendo la CEa a 30 cm y el Na las de mayor variabilidad (42 % y 41 % respectivamente).

4.3.2. Resultados del análisis de correlación de Pearson entre propiedades del suelo

Se encontraron correlaciones significativas tanto positivas como negativas entre las distintas variables físico-químicas excepto para P cítrico, las mismas se muestran en el cuadro No. 14. Las demás correlaciones muestran casos en donde generalidades se cumplen. Por ejemplo, al observar la relación que presenta el CO total con los nutrientes del suelo, surge que éste presentó una correlación fuerte y altamente significativa con N total (0,86), Ca (0,74) y Mg (0,64). A su vez la CIC también mostro una correlación fuerte, positiva y altamente significativa con el CO total (0,81) lo que resulta lógico si se toma en cuenta que esta propiedad del suelo está muy relacionada al contenido de MO y que el CO es el principal componente de esta última.

Ca y Mg se correlacionaron de forma positiva y altamente significativa (0,94), éstos cationes representan el 92 % de las BT, por lo que se correlacionaron de forma positiva, fuerte y altamente significativa con la concentración de BT (0,99 con Ca y 0,96 con Mg) y el porcentaje de SB (0,78 con Ca y 0,85 con Mg). Además, el Ca y Mg son unos de los principales cationes intercambiables del suelo, por lo que manifestaron una correlación positiva y altamente significativa con la CIC (0,98 con Ca y 0,91 con Mg). Por último, la CEa a diferencia de la información internacional solo mostró correlación altamente significativa con Mg (0,39), SB (0,51), pH (0,55) y significativa con BT (0,31).

Cuadro No. 14. Análisis de correlación de Pearson entre las propiedades físico-químicas del suelo

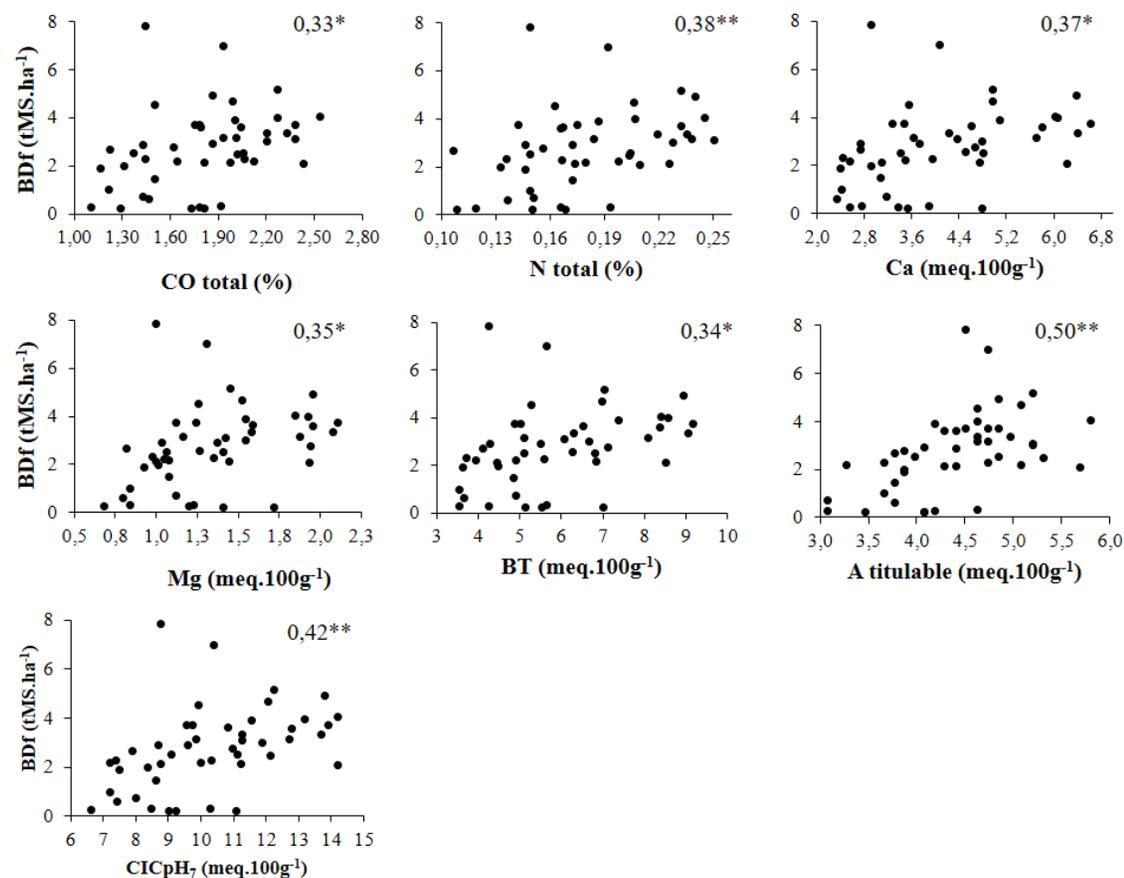
Variable	CO total	N total	P cítrico	K	Ca	Mg	Na	BT	SB	CICpH ₇	A titulable	pH	CEa 30cm	Arena	Limo	Arcilla
(-----%-----)	(-----%-----)	(µg P/g)	(-----meq/100g-----)	(-----meq/100g-----)	(-----meq/100g-----)	(-----meq/100g-----)	(-----meq/100g-----)	(%)	(%)	(-----meq/100g-----)	(-----meq/100g-----)	(-----meq/100g-----)	(mS/m)	(-----%-----)	(-----%-----)	(-----%-----)
CO total	1															
N total	0,86	1														
P cítrico	0,11	-0,03	1													
K	0,40	0,33	0,20	1												
Ca	0,74	0,67	0,01	0,49	1											
Mg	0,64	0,55	-0,02	0,54	0,94	1										
Na	-0,24	-0,19	-0,05	-0,09	0,06	0,04	1									
BT	0,70	0,63	0,01	0,51	0,99	0,96	0,13	1								
SB	0,32	0,25	-0,09	0,45	0,78	0,85	0,37	0,83	1							
CICpH ₇	0,81	0,73	0,07	0,49	0,98	0,91	0,02	0,97	0,66	1						
A titulable	0,83	0,76	0,21	0,28	0,63	0,48	-0,26	0,57	0,04	0,77	1					
pH	-0,19	-0,25	-0,15	-0,02	0,23	0,38	0,41	0,30	0,64	0,11	-0,38	1				
CEa 30cm	-0,01	-0,11	-0,13	0,09	0,26	0,39	0,27	0,31	0,51	0,21	-0,13	0,55	1			
Arena	-0,22	-0,17	-0,16	-0,19	-0,26	-0,26	-0,11	-0,28	-0,22	-0,27	-0,17	-0,16	-0,05	1		
Limo	-0,04	-0,04	0,12	0,01	0,08	0,05	0,46	0,11	0,08	0,09	0,02	0,10	0,07	-0,40	1	
Arcilla	0,21	0,18	0,001	0,14	0,12	0,15	-0,37	0,10	0,08	0,12	0,11	0,02	-0,04	-0,38	-0,69	1

CO total: carbono orgánico total, N total= nitrógeno total, P cítrico= fósforo cítrico, K= potasio, Ca= calcio, Mg= magnesio, Na= sodio, BT= bases totales, SB= saturación de bases, CICpH₇= capacidad de intercambio catiónico a pH₇, A titulable= acidez titulable, CEa 30cm= conductividad eléctrica aparente a 30cm.

 Correlación altamente significativa p ≤ 0,01

 Correlación significativa p ≤ 0,05

Por otro lado, al relacionar los valores de Bdf con las propiedades del suelo se encontraron correlaciones altamente significativas y positivas con N total, A titulable y CIC, significativas y positivas con CO total, Ca, Mg y BT (figura No. 15). Mientras que P cítrico, K, Na, SB, pH, CEa y textura no se correlacionaron de forma significativa con la Bdf (anexo No. 4).

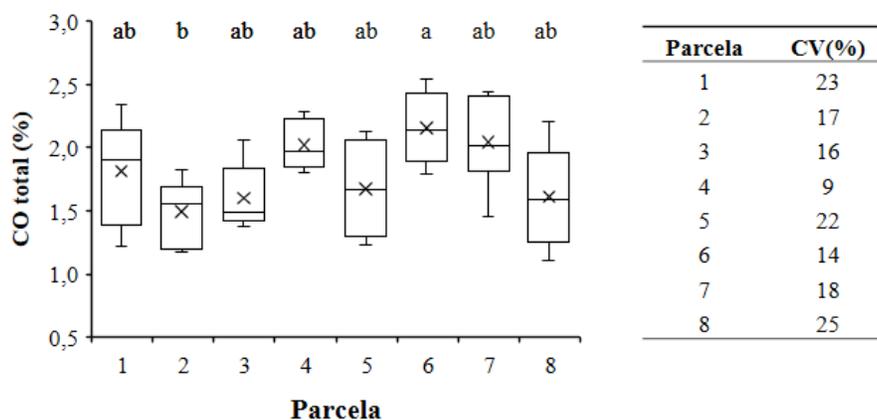


* p-valor $\leq 0,05$ ** p-valor $\leq 0,01$

Figura No. 15. Gráficos de dispersión entre Bdf y propiedades del suelo con su coeficiente de correlación

4.3.3. Comparación de medias y CV para las variables correlacionadas significativamente con Bdf

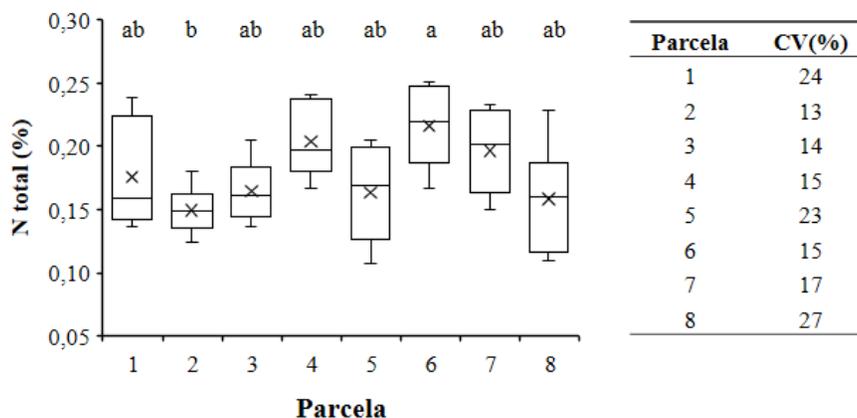
En relación al CO total la parcela 6 fue la que presentó mayor contenido promedio, siendo solo distinta estadísticamente con la parcela 2 (figura No. 16). Aún así, la variabilidad en términos de CV dentro de cada una de ellas resultó similar. La parcela con mayor CV fue la 8 (25 %), mientras que la de menor fue la 4 (9 %), presentando medias estadísticamente iguales.



Letras diferentes indican medias estadísticamente distintas (p -valor $\leq 0,05$)

Figura No. 16. Gráfico box plot para CO total según parcela

El N total se comportó de forma muy similar al CO total, donde al igual que éste la parcela 6 fue la que presentó mayor contenido promedio, siendo solo estadísticamente distinta con la parcela 2 (figura No. 17), aun así, presentaron una variabilidad similar en términos de CV. Además, la parcela 8 continuó siendo la de mayor CV (27 %), mientras que a diferencia del CO total la parcela de menor variabilidad fue la 2 (13 %), presentando de todas formas medias estadísticamente iguales.

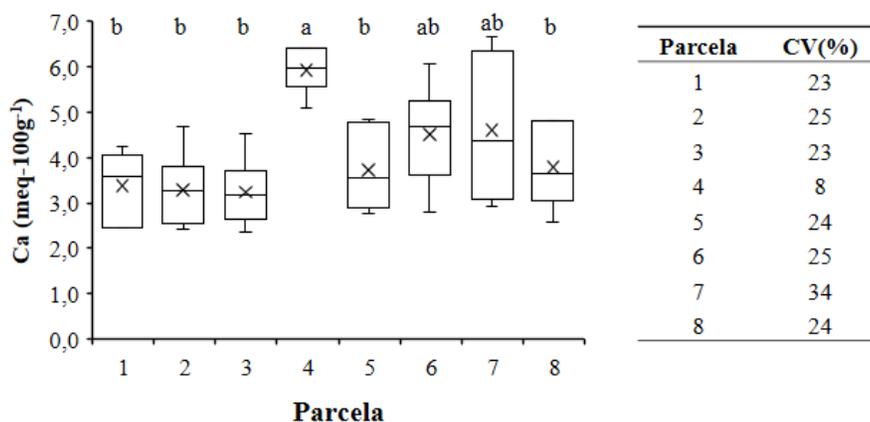


Letras diferentes indican medias estadísticamente distintas (p -valor $\leq 0,05$)

Figura No. 17. Gráfico box plot para N total según parcela

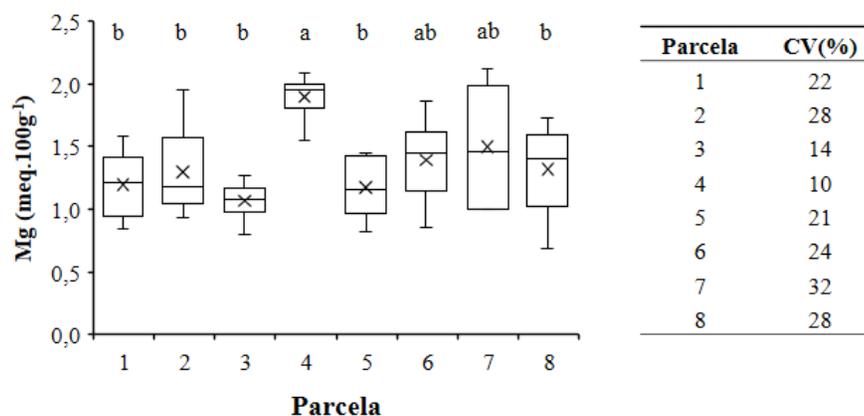
En las figuras No. 18, No. 19 y No. 20 se encuentran los box plots y el CV para cada parcela tanto para Ca, Mg, como para BT. Como resultado del elevado coeficiente de correlación entre ambas bases y que éstas representan el 92 % del complejo de bases de intercambio, es evidente que en aquellas parcelas donde hubo mayor contenido de BT, también lo hubo de Ca y Mg. En este contexto la parcela 4 fue la que mostró mayor contenido promedio diferenciándose estadísticamente de las parcelas 1, 2, 3, 5 y 8. A su

vez esta parcela presentó menor variabilidad según el CV (8 %, 10 % y 7 % para Ca, Mg y BT respectivamente). Por lo contrario, la parcela de mayor variabilidad fue la 7 (34 %, 32 % y 32 % para Ca, Mg y BT respectivamente), aunque en términos de contenido promedio no fueron distintas estadísticamente con la 4.



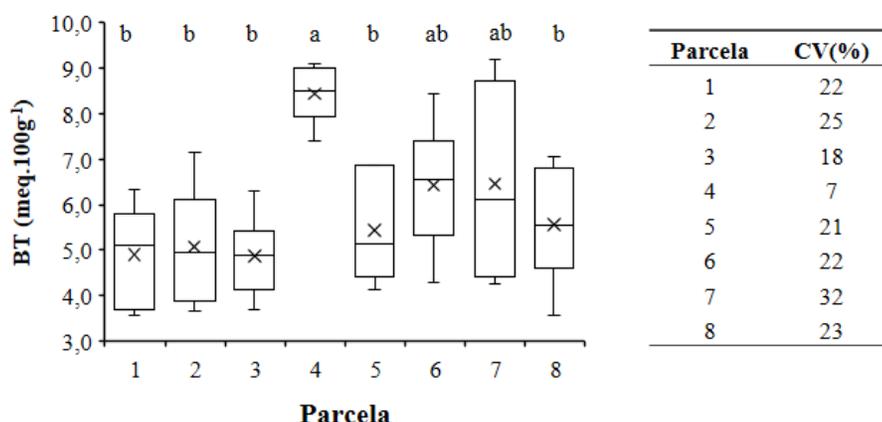
Letras diferentes indican medias estadísticamente distintas (p-valor $\leq 0,05$)

Figura No. 18. Gráfico box plot para Ca según parcela



Letras diferentes indican medias estadísticamente distintas (p-valor $\leq 0,05$)

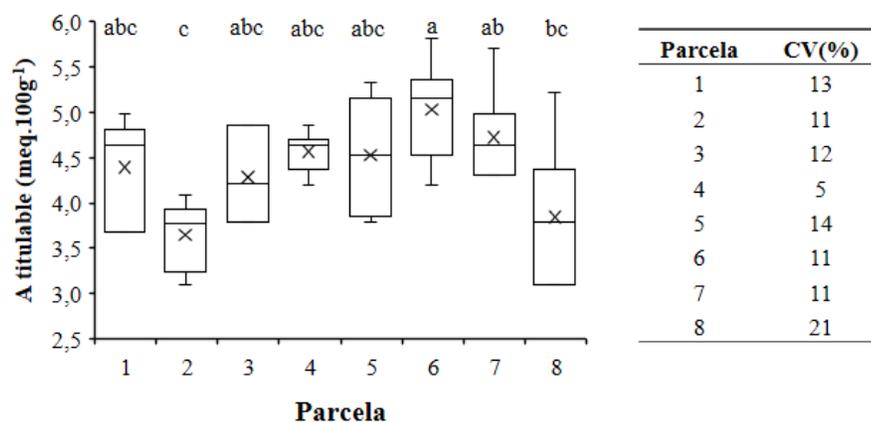
Figura No. 19. Gráfico box plot para Mg según parcela



Letras diferentes indican medias estadísticamente distintas (p-valor $\leq 0,05$)

Figura No. 20. Gráfico box plot para BT según parcela

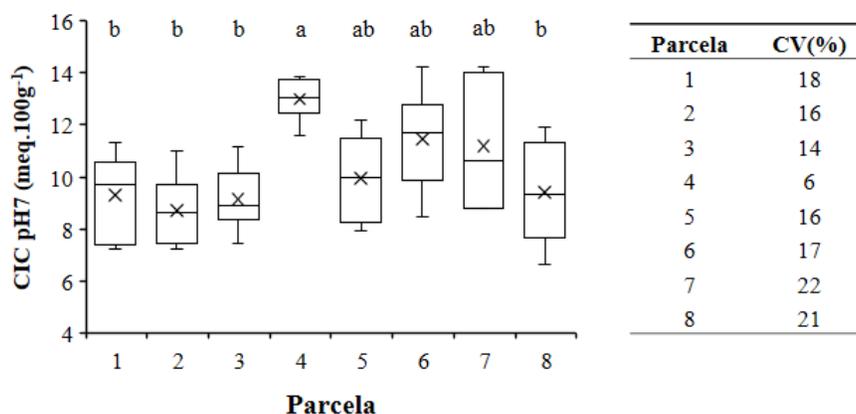
En el caso de los valores de A titulable correspondientes a cada parcela la figura No. 21 muestra que la parcela 6 fue la que presentó mayor contenido promedio, siendo distinta estadísticamente a las parcelas 8 y 2. En relación a la variabilidad las parcelas 6 y 2 presentan igual CV (11 %), mientras que la 8 presentó un valor superior (21 %) siendo así la parcela que varió más. Por otro lado, la parcela que mostró menor variabilidad fue la 4 (5 %), siendo estadísticamente igual al resto de las parcelas en términos de concentración media.



Letras diferentes indican medias estadísticamente distintas (p-valor $\leq 0,05$)

Figura No. 21. Gráfico box plot para A titulable según parcela

Por último, en relación a la CIC la parcela 4 fue la que presentó menor variabilidad (CV = 6 %) y mayor contenido promedio, diferenciándose estadísticamente de las parcelas 1, 2, 3 y 8 (figura No. 22). Esta última junto a la parcela 7 fueron las que presentaron mayor CV (21 % y 22 % respectivamente).



Letras diferentes indican medias estadísticamente distintas (p -valor $\leq 0,05$)

Figura No. 22. Gráfico box plot para CIC pH₇ según parcela

4.3.4. Análisis de estructura espacial y predicción mediante kriging

En el anexo No. 5 se presentan los gráficos de distribución de frecuencia con el coeficiente de asimetría para las variables que mostraron correlación con la BDF, así como los gráficos de dispersión de los valores de cada variable según las coordenadas X y Y. Se encontró que solo para Ca y BT el supuesto de normalidad no se cumplió, por lo que se precedió a transformar ambas variables a logaritmo natural (Ln), mejorando tanto el ajuste de la curva normal como el coeficiente de asimetría. Los gráficos de dispersión no mostraron tendencia para ninguna de las variables y en consecuencia se asume el cumplimiento del supuesto de estacionaridad.

En el cuadro No. 15 y la figura No. 23 se presentan los modelos teóricos ajustados a los modelos experimentales para cada variable. En el caso de N total se ajustó un modelo esférico, mientras que para el resto de las variables el modelo que mejor ajustó fue el exponencial.

Cuadro No. 15. Modelos de autocorrelación espacial ajustados y sus componentes para las variables de suelo correlacionadas con las BDF

Variable	Modelo	Nugget (ttMS.ha ⁻¹)	Sill (ttMS.ha ⁻¹)	Rango (m)	Nugget/ sill (%)	Dependencia espacial
CO total	Exponencial	0,01	0,1681	50	3	Fuerte
N total	Esférico	0,00	0,0015	52	0	Fuerte
Ln Ca	Exponencial	0,00	0,09	57	0	Fuerte
Mg	Exponencial	0,04	0,16	89	23	Fuerte
Ln BT	Exponencial	0,00	0,08	48	0	Fuerte
CICpH ₇	Exponencial	0,00	4,57	55	0	Fuerte
A tit.	Exponencial	0,00	0,47	45	0	Fuerte

El rango para las variables analizadas fue muy inferior a la distancia máxima del área de muestro (800 m), siendo el Mg quien mostró el mayor rango de autocorrelación espacial con 89 m y la A. titulable la menor con 45 m (cuadro No. 15). Todas las variables presentaron una relación nugget/sill inferior al 25%, por lo que la dependencia espacial se clasificó como fuerte. Para 5 de las 7 variables (N total, Ln Ca, Ln BT, CICpH7 y Ac titulable) esta relación fue igual a 0, por lo que no existió error experimental atribuido al mínimo espaciamiento entre los puntos de muestreo.

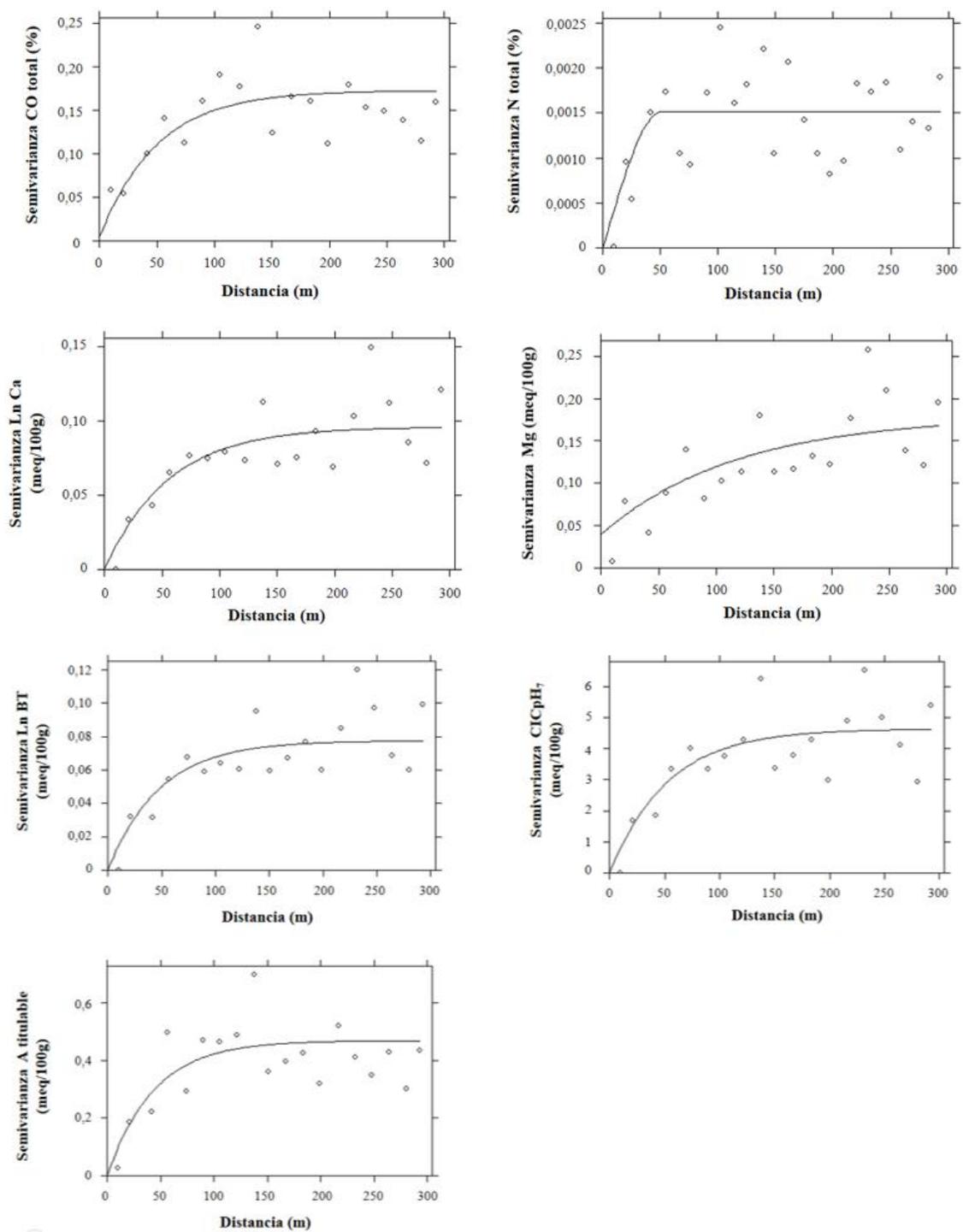


Figura No. 23. Semivariograma de las variables correlacionadas significativamente con la Bdf

Los resultados del método de validación cruzada de los modelos de semivariograma se presentan en el cuadro No. 16, donde se observa que para ningún modelo teórico ajustado se alcanzaron coeficientes de determinación elevados, siendo el modelo para Ln Ca el que presentó mayor R^2_{Aj} , por lo que si se considera que en el mejor de los casos solo se logra predecir los valores observados en un 42 %, la capacidad predictiva que presentaron estos modelos de semivariograma fue pobre.

Cuadro No. 16. Validación cruzada para los modelos de semivariograma ajustados para las variables de suelo correlacionadas con las BDf

Variable	Modelo	R^2_{Aj} (%)
CO total	$Y = 0,206 + 0,886X$	31
N total	$Y = 0,002 + 0,987X$	21
Ln Ca	$Y = 0,134 + 0,901X$	42
Mg	$Y = 0,173 + 0,872 X$	28
Ln BT	$Y = 0,212 + 0,878X$	36
CICpH ₇	$Y = 0,979 + 0,905X$	41
A tituable	$Y = 0,652 + 0,852X$	28

En este contexto, los modelos de semivariograma obtenidos para cada variable no serían útiles para predecir la variable en aquellos puntos no muestreados, ya que la bondad de ajuste de éstos según la validación cruzada no fue satisfactoria. De todas formas, el resultado de la interpolación mediante kriging que se presentan en la figura No. 24 muestra patrones de concentración de estas propiedades edáficas en el terreno.

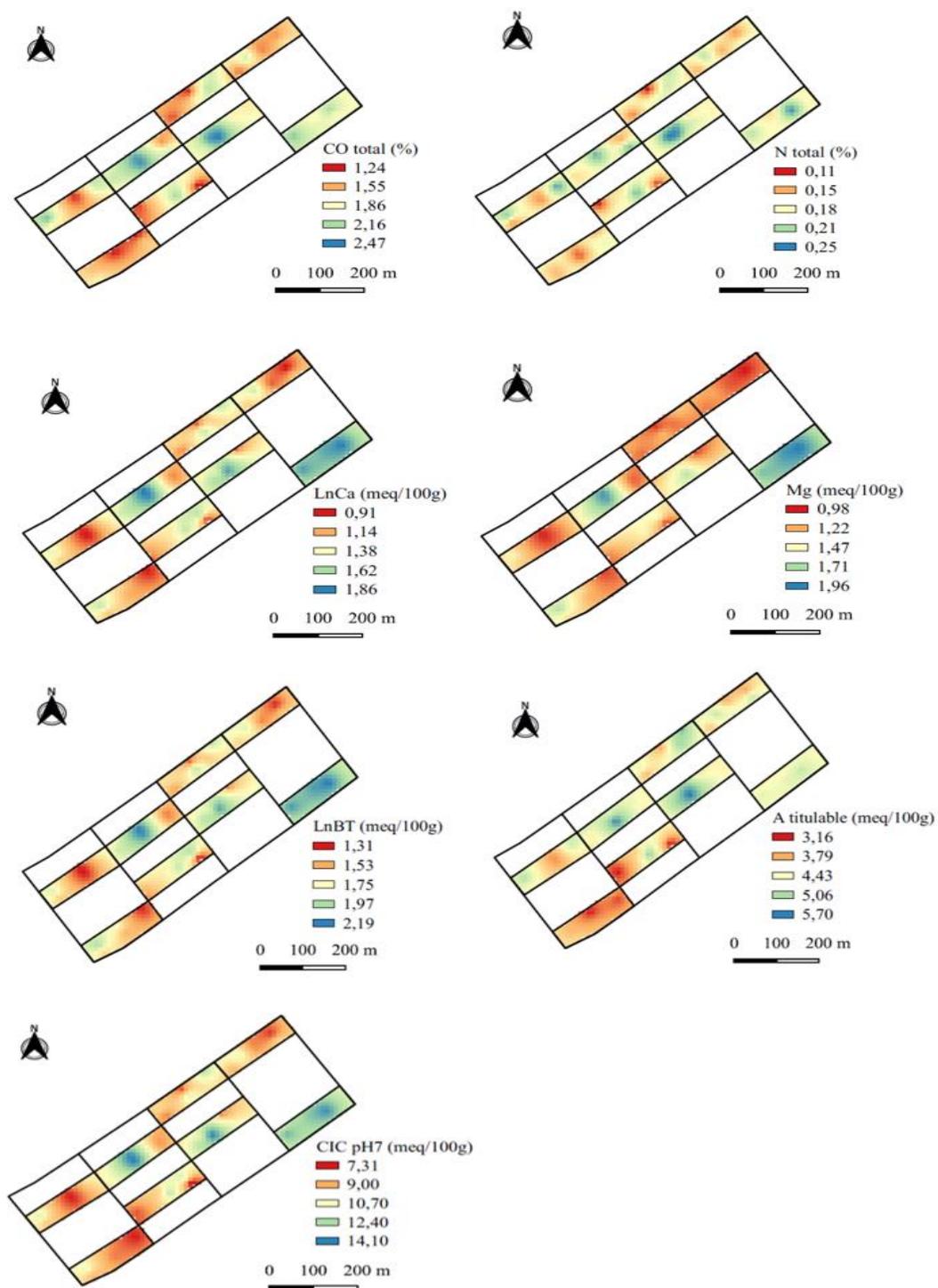


Figura No. 24. Kriging de las distintas variables correlacionadas significativamente con la BDF

4.4. RESULTADOS SOBRE EL PASTOREO ANIMAL

Como ya fue mencionado en el apartado de metodología se contaba con dos grupos de animales que pastoreaban uno u otro de los dos tratamientos seleccionados del experimento original. La figura No. 25 presenta las distintas frecuencias de visita de pastoreo que se registraron dentro de cada UM de las parcelas correspondientes al tratamiento Fo para cada nivel de Bdf, mientras que la figura No. 26 lo hace para las UM de las parcelas del tratamiento Fo+.

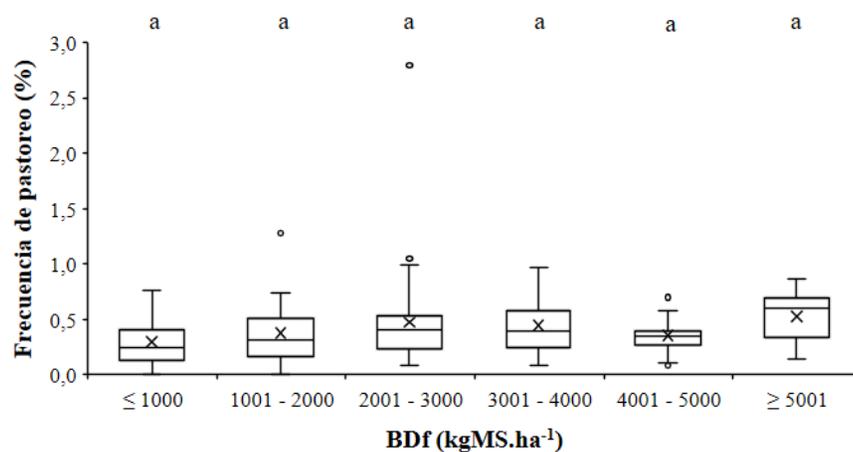


Figura No. 25. Gráfico box plot de frecuencia de visita de pastoreo según categoría para las UM de las parcelas 1, 4, 5 y 8

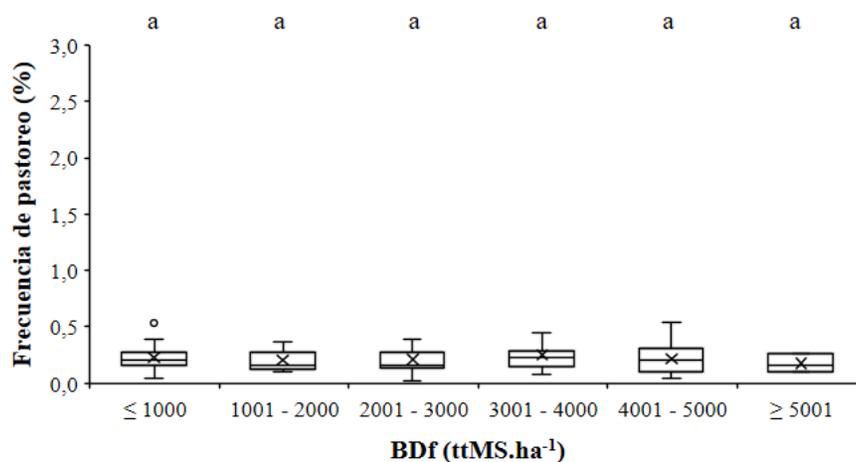


Figura No. 26. Gráfico box plot de frecuencia de visita de pastoreo según categoría para las UM de las parcelas 2, 3 y 6

El efecto de la cantidad de forraje disponible de festuca tanto en las UM de las parcelas del tratamiento Fo (1, 4, 5, y 8), como en las del Fo+ (2, 3 y 6) no fue significativo sobre la frecuencia de visita del pastoreo animal (p -valor = 0,24 y 0,58 respectivamente),

pero como se observa en el cuadro No. 17 si tiene efecto significativo sobre los distintos parámetros de calidad.

Cuadro No. 17. Concentración de PC, FDN, FDA y cenizas en función de la Bdf

Bdf (kgMS.ha⁻¹)	PC (%)	FDN (%)	FDA (%)	Ceniza (%)
≤ 1000	19,42 ab	53,24 d	31,72 bc	10,51 ab
1001 – 2000	19,85 ab	54,17 d	31,72 bc	10,64 ab
2001 – 3000	20,25 a	54,56 cd	31,52 c	10,78 a
3001 – 4000	19,45 ab	55,69 bc	31,68 bc	10,63 ab
4001 – 5000	18,57 bc	56,84 ab	32,82 b	10,47 ab
≥ 5001	17,87 c	57,71 a	33,26 a	10,37 b
Sig. (p-valor)	< 0,0001	< 0,0001	0,0005	0,006

Letras distintas dentro de cada columna muestran diferencias significativas (p-valor ≤ 0,05)

Los valores de Bdf dentro del rango de 2001 a 3000 kgMS.ha⁻¹ presentaron valores estadísticamente superiores de PC e inferiores de FDN y FDA a aquellos mayores a 4001 kgMS.ha⁻¹, donde la proporción de vainas y material senescente es mayor.

4.4.1. Variabilidad de la masa de forraje pre y post pastoreo

En relación a la variabilidad que generan los animales durante la actividad de pastoreo en el cuadro No. 18 se presentan los CV correspondientes a la Bdf y BRf para cada parcela, donde se observa que en todas excepto para la 7 y 8 la variabilidad post pastoreo aumenta.

Cuadro No. 18. Variabilidad en términos de CV para la Bdf y la BRf según parcela

Parcela	CV (%)	
	Bdf	BRf
1	40	49
2	53	54
3	44	61
4	17	30
5	35	46
6	38	51
7	37	34
8	95	75

5. DISCUSIÓN

De acuerdo a los parámetros determinados sobre la pastura presentados en el cuadro No. 10, las parcelas del cultivar INIA Fortuna mostraron elevados valores de MS disponible de festuca, proporción de festuca, altura, NVDI y PC, evidenciando el buen estado general de éstas. Teniendo en cuenta que se trata de una pastura cursando su 5to año productivo y que en sistemas pastoriles nacionales éstas en general no duran más de 4 años (García et al., 1981), es claro que las prácticas de manejo implementadas en este sistema han logrado que la especie sembrada presente una alta persistencia. En este sentido los resultados reportados por Herken et al. (2019), quienes estudiaron la sobrevivencia de macollos de un año a otro sobre las mismas parcelas de este ensayo, demuestran que en promedio el número de macollos que sobreviven por metro cuadrado es de entre 2000 a 4000 en un período de estudio de 4 años para el cultivar INIA Fortuna.

La fertilización nitrogenada estacional con 46 kg N.ha⁻¹ aparece como una de las razones que puede explicar la persistencia de la especie, los altos valores de MS disponible, el elevado porcentaje de festuca, así como los altos niveles de PC y de NDVI. En este sentido, esta estrategia de fertilización ha mostrado impacto sobre la productividad de pasturas puras de festuca incrementado en un 58 % la producción anual de MS.ha⁻¹ en comparación a la no fertilización con este nutriente (Formoso, 2010).

El alto valor medio de NVDI dado el nivel de agregado de N, refleja el alto vigor de planta y cobertura del suelo como también las buenas condiciones nutricionales (especialmente de N) que exhibía la pastura. Estos niveles de NVDI (0,86) se encuentran por encima de los valores máximos descriptos por Pérez (2018) a partir de los cuales este índice se satura. Además, son superiores a los reportados por Holben (1986) para una vegetación densa (0,70), así como los encontrados por Lara y Gandini (2016) en pasturas con predominancia de festuca sp. (0,75).

Como ya ha sido mencionado la estrategia de pastoreo se basaba en ocupaciones de 10 días y descansos de 30 días con 7 novillos por parcela, además del ingreso de animales volantes como forma de mantener una altura remanente de 10-12 cm. Sin embargo, las alturas medias registradas pre y post pastoreo se ubicaron en los 27 y 13 cm respectivamente, siendo muy superiores a las recomendadas por Ayala et al. (2010) para este cultivar (15-18 cm ingreso, 5-7 cm egreso). Estos valores de alturas observados podrían ser el resultado de las altas tasas de crecimiento en torno a los 45-50 kgMS.ha⁻¹.día⁻¹ que presenta este material durante los meses de primavera (Pereyra, 2019), como producto del cambio del estado fenológico de las plantas.

Más allá de las alturas promedio que presentó el forraje disponible, la calidad de éste fue elevada, en este sentido el contenido de PC no difirió al de un cultivo anual de *Lolium multiflorum* (19 %), siendo además superior al contenido promedio que se reporta para este cultivar según el programa nacional de pasturas y forrajes de INIA (Ayala et al., 2010). Una vez más la estrategia de fertilización surge como una de las razones de este

elevado % PC, ya que autores como Wagner (1954), Ramaje et al. (1958) entre otros, afirman que a medida que se incrementa la disponibilidad de N el contenido de PC de un forraje aumenta.

En relación a uno de los objetivos generales de este trabajo de evaluar las zonas más frecuentadas por los animales durante el pastoreo, se obtuvo que la disponibilidad de forraje no incidió en diferencias significativas sobre la frecuencia de visita animal (figuras No. 25 y No. 26), a diferencia de lo afirmado por O'Regain y Schwartz (1995) quienes observaron que existe una respuesta consistente de los animales al parcheado. Además, tampoco coincide con lo reportado por Cid y Brizuela (1998), donde en pasturas de alta disponibilidad de forraje los animales prefieren pastorear repetidamente áreas intensamente pastoreadas con alturas entorno a los 7-10 cm.

El hecho de no haber encontrado diferencias en las zonas frecuentadas se explica tanto por las características estructurales de la pastura, la cantidad y calidad del forraje, el tamaño del potrero, así como por la distancia al agua de bebida. En relación a las características estructurales Hodgson (1990) sugiere que el consumo voluntario de materia seca se ve restringido con alturas inferiores a los 9 cm, por lo que las alturas promedio que presentó la pastura durante los 40 días del ciclo de pastoreo no habrían limitado el consumo de forraje por parte de los animales. Con respecto a la distancia al agua de bebida, los animales en pastoreo debían recorrer una distancia máxima de 200 m al bebedero a lo que Valentine (1947) considera dentro del rango donde la utilización de forraje es máxima, considerando que a partir de los 800 m ésta cae generando una mayor heterogeneidad de la pastura. Además, la ausencia de sombra puede ser otro de los factores que expliquen los resultados obtenidos, debido a que Bailey y Provenza (2008) afirman que la disponibilidad de sombra y reparo afecta la uniformidad del pastoreo.

Sumado a lo anterior Loza (1993) afirma que la carga instantánea incide sobre la selectividad animal, en este sentido la carga promedio manejada durante el periodo de estudio de 19 animales/ha, surge como un factor en explicar la ausencia de selectividad observada. Por otro lado, existieron cambios en la calidad del forraje por cambios en la cantidad de MS (cuadro No. 17), pero no sobre la frecuencia de visita a determinada zona durante el pastoreo (figuras No. 25 y No. 26), por lo que es claro que la cantidad y calidad del forraje disponible no influyó en la distribución espacial del pastoreo a diferencia de lo indicado por Díaz Falú et al. (2014).

Como fue mencionado al inicio de este trabajo uno de los objetivos específicos consideraba caracterizar desde el punto de vista edáfico el sitio experimental. En este sentido, considerando los valores de MO reportados por MAP. DSF (1979) para los mismos suelos que dominan en el sitio experimental (Argisoles), sumado a la predominancia de texturas franco arcillo arenosa a franco arcillosas es claro que se tratan de suelos de fertilidad media.

La acidez del suelo y el contenido de los principales nutrientes, fue similar a los valores reportados por Quincke et al. (2019) a excepción del P cítrico el cual mostró un

valor muy superior. Este contenido de P cítrico se explica por el efecto acumulativo de las deyecciones por parte de los animales, los cuales devuelven aproximadamente un 75-90 % del P presente en el forraje consumido (Whitehead, 2000), así como por los niveles de agregados de P los cuales a partir del 2013 hasta el 2016 sumaron más de 77 kg P₂O₅.ha⁻¹. Por su parte, el valor medio de CEa de 0-30 cm de profundidad del suelo fue igual a 14,45 mS.m⁻¹, siendo inferior al reportado por Pravia (2009) para suelos de la misma unidad (30 mS.m⁻¹). Corwin et al. (2003b) mencionan que el contenido de humedad en el suelo influye en el valor promedio obtenido de CEa. Por lo tanto, esta diferencia en el valor medio de CEa puede estar explicada por las distintas condiciones de humedad al momento de determinar la CEa en ambos trabajos.

Además de la caracterización edáfica se buscó conocer las relaciones existentes entre las distintas propiedades físico-químicas determinadas. Del conjunto de relaciones evaluadas, el P cítrico fue la única propiedad que no mostró estar correlacionada a ninguna de las demás, la ausencia de correlación con propiedades como el CO total se relaciona a la forma de determinar el contenido de este nutriente en el suelo, ya que según Morón (1992) los métodos de estimación de P extraen aquella fracción del fósforo inorgánico presente en fase sólida capaz de reponer el fósforo presente en la solución del suelo, distinto habría sido si en lugar de determinar el nivel de P disponible se hubiese estimado el contenido de P total, debido a que como bien lo menciona Zamalvide (1992) las formas orgánicas de este nutriente representan el 51 % del P presente en el suelo.

Por otro lado, y a diferencia de lo afirmado por Corwin y Lesch (2003a), así como por Serrano et al. (2010) que la CEa está influenciada por propiedades como la MO, la CIC, el % de arcilla y la concentración de sales, ésta solo se correlacionó de forma significativa con Mg, BT, SB y pH. En relación al resultado de correlación lineal entre CEa y pH obtenido, Simón et al. (2013) encontraron un coeficiente de correlación de Pearson similar (0,55 vs. 0,43), mientras que Corwin et al. (2003b) observaron una relación negativa de la CEa con este (-0,33). La correlación con el % SB fue más débil (0,51 vs. 0,70) a la reportada por Corwin et al. (2003b). Por último, y a diferencia de los resultados obtenidos en este trabajo, Corwin et al. (2003b), Simón et al. (2013), Coitiño-López et al. (2015) encontraron correlaciones altas y positivas entre la CEa y el % de arcilla, así como con el contenido de MO.

De acuerdo al objetivo de analizar, cuantificar y mapear la variabilidad espacial en la disponibilidad de materia seca y algunas propiedades físico-químicas del suelo, la BDf, así como la BRf exhibieron valores de CV dentro de los rangos reportados por Hirata y Fukuyama (1997), Hirata (2002). El CO total presentó un CV igual a 21 %, siendo éste próximo al reportado tanto por Cambardella et al. (1994), como por Cambardella y Karlen (1999), aunque superior al mostrado posteriormente por Kariuki et al. (2009). La variabilidad del N total (22 %) estuvo dentro de los valores (17-28 %) encontrados por autores como Cambardella et al. (1994), Cambardella y Karlen (1999), Arango y Jaramillo (2006), Kariuki et al. (2009). Por otro lado, el contenido de P presentó un CV igual a 26 %, siendo similar al reportado por Shi et al. (2000), aunque inferior a los encontrados tanto

por Cambardella et al. (1994) como por Kariuki et al. (2009) y muy inferior al por Bernardi et al. (2016).

El conjunto de bases de intercambio, K, Ca y Mg mostraron una variabilidad según el CV de 30, 30 y 28 % respectivamente. Autores como Cambardella et al. (1994), Cambardella y Karlen (1999), Bernardi et al. (2016) encontraron valores similares de CV para K, mientras que Fu et al. (2013) reportaron valores muy superiores para este nutriente. Con respecto al CV obtenido para Ca y Mg, Bernardi et al. (2016) encontraron valores menores de variabilidad para ambas bases. En este mismo sentido, Cambardella y Karlen (1999) observaron el mismo comportamiento para Ca, mientras que Mg presentó mayor variabilidad.

Por otro lado, el CV de la CIC (20 %) fue muy superior al conseguido por Kilic et al. (2012), así como por Bernardi et al. (2016), mientras que Obando et al. (2006) obtuvieron un CV igual. La baja variabilidad observada en los valores de pH fue siempre inferior en comparación a la reportada por autores como Cambardella y Karlen (1999), Obando et al. (2006), Fu et al. (2013), Bernardi et al. (2016). Por último, la CEa de 0-30 cm fue la propiedad edáfica que presentó mayor variabilidad (CV = 42 %), siendo similar a la encontrada por Pravia (2009), Jabro et al. (2010), inferior a la por Bernardi et al. (2016) y superior a la por Paggi et al. (2011), Coitiño-López et al. (2015).

Sumado a lo anterior los cuadros No. 11 y No. 15 muestran la estructura espacial para cada variable según los modelos de semivariograma ajustados. En primer lugar, la BDF mostró según la relación nugget/sill tener una dependencia espacial moderada y un rango de autocorrelación espacial de 63 m. Aun así, el resultado arrojado por la validación cruzada presentado en el cuadro No. 12, sugiere que la capacidad de predicción del modelo ajustado es solo de un 44 %. Este coeficiente de determinación si bien resulta ser bajo, a nivel nacional e internacional no existen trabajos que hayan estudiado la estructura espacial y obtenido valores de R^2_{Aj} para la disponibilidad de forraje en pasturas con los cuales contrastar. Por lo tanto, el hecho de no haber podido modelar la variabilidad espacial presente en la BDF, no permitió considerarla al momento de presupuestar la cantidad de forraje disponible en el corto y mediano plazo.

Una posibilidad para lograr mejorar el R^2_{Aj} sería aplicar otro de los métodos de interpolación en geoestadística denominado cokriging, que permite el estudio de la dependencia espacial entre dos propiedades correlacionadas (Morales, 2004). El hecho de que la BDF se haya correlacionado significativamente con propiedades del suelo, permitiría determinar el comportamiento espacial de ella en función de éstas a través de la aplicación de esta técnica, dado que el cokriging además de analizar la correlación espacial utiliza la correlación entre distintas variables de forma de predecir los valores de la variable de interés en sitios no muestreados (Morales, 2004).

En segundo lugar, el resultado del análisis de variabilidad espacial correspondiente a las propiedades del suelo arrojó que para todas, el grado de dependencia espacial fue fuerte. Similares resultados fueron reportados por Cambardella et al. (1994)

para CO total y N total, así como por Cambardella y Karlen (1999) para Mg, mientras que estos últimos autores (Cambardella y Karlen, 1999) para CO total y Ca encontraron una dependencia espacial moderada. Por su parte Kariuki et al. (2009) también observaron una dependencia espacial fuerte para CO total, pero débil para N-NO₃, mientras que Arango y Jaramillo (2016) encontraron que éste presentaba una correlación espacial fuerte a moderada. Obando et al. (2006) evaluaron la estructura espacial de algunas propiedades de suelo y observaron que al igual que el grado de autocorrelación encontrado, la CIC presentó una dependencia espacial fuerte, lo que difiere a lo reportado por Kilic et al. (2012), Bernardi et al. (2016) quienes encontraron una dependencia moderada. Estos últimos autores (Bernardi et al., 2016) además estudiaron la variabilidad espacial del Ca y Mg y concluyen que ambas bases presentaron débil correlación espacial entre las muestras.

El CO total presentó un rango de 50 m de autocorrelación espacial, siendo muy inferior a los rangos encontrados por Cambardella et al. (1994), Cambardella y Karlen (1999), Kariuki et al. (2009). Lo mismo ocurre al observar el rango alcanzado por el N total (52 m), el cual es menor a los reportados por Cambardella et al. (1994), Cambardella y Karlen (1999). Con respecto a la distancia a partir de la cual deja de existir correlación espacial, las muestras de Ca y Mg se autocorrelacionaron hasta los 57 y 89 m respectivamente, siendo estos rangos similares a los encontrados por Cambardella y Karlen (1999), así como por Bernardi et al. (2016) para Ca, pero inferiores para Mg. La CIC tuvo un rango de 55 m, similar a los observados por Kilic et al. (2012), como por Bernardi et al. (2016) pero inferior al reportado por Obando et al. (2006).

Más allá de la estructura espacial definida anteriormente para las propiedades del suelo, del cuadro No. 16 surge que éstas no mostraron autocorrelación espacial significativa en el sitio de estudio, debido a que no se logró obtener un alto coeficiente de determinación entre los valores observados vs. los predichos por los modelos de semivariograma obtenidos. En consecuencia, no fue posible delinear zonas homogéneas en función de estas propiedades y de la Bdf a las cuales aplicarle un manejo sitio específico basado en la grilla de muestreo de suelo utilizada.

Como forma de integrar los resultados obtenidos sobre cada componente del sistema suelo-planta, la figura No. 15 mostró las correlaciones que resultaron ser significativas entre la Bdf y las propiedades del suelo. En términos generales los coeficientes de correlación no resultaron elevados, sin embargo, en la figura No. 27 se observa que en la mayoría de las parcelas los valores máximos y mínimos de Bdf generan un patrón que coincide a aquél producido por el CO, N, Ca, Mg, BT, A titulable y CIC.

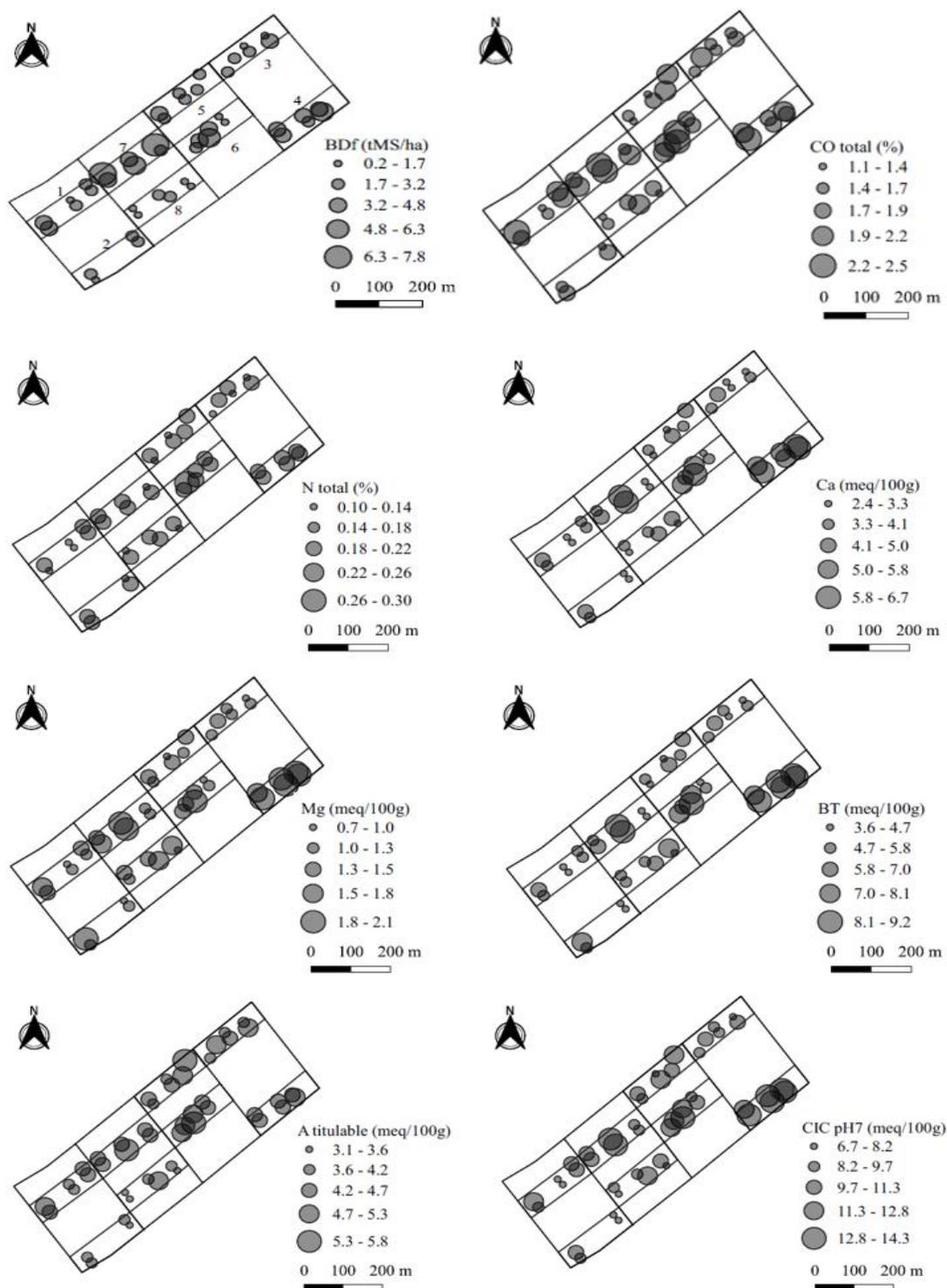


Figura No. 27. Mapas de burbuja de BDF y las distintas variables correlacionadas significativamente con ésta

En este contexto de integración, los mayores valores medios de CO, N, Ca, Mg, BT, A titulable y CIC se registraron en las parcelas 4 y 6, siendo distintas estadísticamente a una o más parcelas en función de la variable que se considere. Al observar la variabilidad presente dentro de cada una de las parcelas, surge que la parcela 4 además de ser la de mayor valor promedio en la mayoría de los casos, fue la que presentó menor variabilidad en términos de CV a excepción del N la cual ocupa el 3er lugar junto a la parcela 2 y 3. Al igual a lo anterior, la parcela 4 exhibió el mayor valor promedio de BDF, como también la menor variabilidad en relación al resto de las parcelas, lo que demuestra la gran influencia que tienen estas propiedades sobre la masa de forraje presente en un momento dado. En contra parte y de forma consistente la parcela 8 fue la que manifestó los mayores valores de CV, siendo así la parcela de mayor variabilidad para todas las variables evaluadas.

Además de las propiedades físico-químicas mencionadas anteriormente, la topografía y tipo de suelo aparecen como factores relevantes en explicar la distribución espacial del forraje disponible. En este sentido, la figura No. 28 muestra la distribución de los valores de BDF y su asociación con los cambios en la topografía del terreno, donde es claro la influencia de ésta en la variabilidad espacial de la BDF. En términos generales las parcelas ubicadas en zonas de laderas (donde ocurren los suelos del tipo argisoles) presentaron los mayores valores de BDF, mientras que aquellas ubicadas en zonas de meseta (asociados a planosoles de drenaje imperfecto) mostraron disponibles menores.

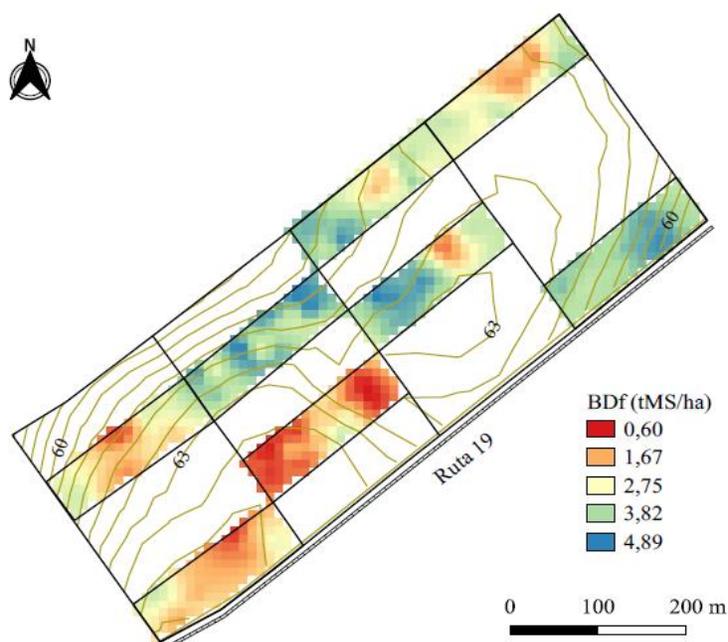


Figura No. 28. Distribución espacial de la BDF asociado a las curvas topográficas cada 0,5 m

Por último, y sumando al análisis el componente animal, el cuadro No. 18 presentó los valores de CV pre y post pastoreo correspondientes a cada parcela. Los resultados muestran que en la mayoría de las parcelas la variabilidad en la BRf fue mayor en relación a la de la BDf, concordando con lo afirmado por Hirata y Fukuyama (1997), Hirata (2002). Este incremento en la variabilidad puede estar relacionada al momento del año en el que se tomaron las muestras, donde el cultivar INIA Fortuna experimenta cambios fenológicos pasando del estado vegetativo al reproductivo (Ayala et al., 2010). Los cambios físicos y químicos que ocurren en cada planta en ese momento podrían estar generando una respuesta selectiva por parte del animal lo cual se manifiesta en un incremento de la variabilidad dentro de las parcelas.

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que en pasturas puras de *Festuca arundinacea* existe presencia de variabilidad espacial a escala de potrero en la disponibilidad de MS, así como en distintas propiedades físico-químicas del suelo. La topografía aparece como un factor relevante en explicar la distribución espacial de los valores de BDf así como de importantes propiedades edáficas. En este contexto, el hecho de no lograr conocer la estructura espacial de éstas propiedades habiendo implementado una grilla de muestreo intensa, sugiere la necesidad de desarrollar líneas de investigación concretas para una mejor comprensión de la variabilidad espacial de los componentes del sistema suelo-planta-animal.

En este sentido, surgen nuevas interrogantes sobre el dimensionamiento y estructura de potreros y la posibilidad de un manejo sitio específico en pasturas bajo pastoreo directo, fundamentadas en: 1) la ausencia de autocorrelación espacial en la masa de forraje disponible utilizando una grilla de muestreo intensiva, 2) el no efecto de la cantidad y calidad de la biomasa disponible en la distribución del pastoreo y 3) la ausencia de una estructura espacial significativa en propiedades del suelo como CO, N, Ca, Mg, BT, A titulable y CIC. El tamaño y estructuramiento de los potreros, así como la dinámica de redistribución de nutrientes a través de heces y orina de los animales, sumado a los niveles de fertilización agregados en sistemas ganaderos intensivos, deberían ser estudiados ya que podrían repercutir en acciones de manejo que tiendan a una producción más eficiente y de menores riesgos ambientales y económicos.

6. CONCLUSIONES

La BDf, así como las distintas propiedades físico-químicas del suelo evaluadas en el sitio presentaron variabilidad espacial. Aún así, la estructura espacial de la BDf, como la de aquellas propiedades edáficas que mostraron estar correlacionadas con ésta, no pudo ser modelada de forma robusta.

La variabilidad de la BDf fue menor en las parcelas de mayor disponibilidad de forraje respecto a las de menor disponibilidad.

Propiedades del suelo como el CO, N, Ca, Mg, BT, A tituable y CIC mostraron estar correlacionadas significativamente, aunque de forma no muy fuerte con la BDf, aun así, los patrones de los mapas de distribución espacial demuestran que éstas propiedades tuvieron influencia sobre los valores de forraje disponible.

La topografía y tipo de suelo aparecen como factores relevantes en explicar la distribución espacial del forraje disponible.

El resultado del pastoreo animal generó incrementos en la variabilidad espacial en aquellas parcelas de alta disponibilidad de MS respecto a las de menor disponibilidad. En contra parte, cuando la cantidad de MS disponible fue baja el efecto del pastoreo disminuyó la variabilidad dentro de la parcela.

La disponibilidad de forraje en las parcelas no condicionó la frecuencia de visita animal a una determinada zona. El estructuramiento y dimensionamiento de las parcelas, así como la carga promedio del sistema, surgen como unas de las principales razones que explican estos resultados.

La CEa de 0-30 cm de profundidad no se correlacionó significativamente con las propiedades del suelo evaluadas. Las mediciones georreferenciadas de CEa en las condiciones evaluadas no se correlacionó significativamente con la variabilidad espacial de propiedades del suelo y por lo tanto de la productividad de una determinada zona.

El NVDI en pasturas puras de alta densidad y disponibilidad de forraje toma valores por encima del límite a partir del cual este índice se satura (0,80) no estando correlacionado con la MS disponible y por lo tanto no fue capaz de reflejar cambios en la cantidad de biomasa acumulada.

7. RESUMEN

En sistemas pastoriles es frecuente la presencia de variabilidad espacial en atributos de la pastura, del suelo, así como en la distribución de los animales en pastoreo. La posibilidad de analizar, cuantificar y mapear como se distribuye en el espacio la biomasa disponible, así como los factores que la afectan permitirían generar información precisa y objetiva al momento de presupuestar la cantidad de forraje disponible para la alimentación de ganado. Los objetivos de este trabajo fueron cuantificar, analizar y mapear la variabilidad espacial en la disponibilidad de materia seca y algunas propiedades físico-químicas del suelo a nivel de potrero sobre una pastura bajo pastoreo de 5^{to} año de *Festuca arundinacea* (cultivar INIA Fortuna), ubicada sobre suelos de la Unidad Alférez. Además, se buscó identificar las zonas más frecuentadas por los animales durante el pastoreo. El experimento fue llevado a cabo en la Estación Experimental del Este - Unidad Experimental “Palo a Pique” (UEPP) del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) ubicada en el departamento de Treinta y Tres - Uruguay. Se instalaron tres grillas de muestreo con dimensiones de 50*50 m, subdivididas a su vez en rectángulos de 10*16,6 m en 8 potreros de 1,2 ha. Dentro de cada uno de éstos se tomaron muestras de forraje cortando al ras del suelo previo al ingreso de los animales e inmediatamente posterior a su salida y muestras de CO total, N total, P-cítrico, Ca, Mg, K, Na, pH, textura, CIC a pH₇, A. titulable, BT y SB a una profundidad de 0-15 cm. Cada muestra fue georreferenciada a través de un GPS Garmin eTrex Venture® HC. Además, se determinó a campo la CEa a una profundidad de 0-30 cm utilizando el sensor VERIS 3100®. El pastoreo se basaba en la utilización de 21 novillos cruza Aberdeen Angus. De éstos se seleccionaron 4 a los cuales se les colocó durante un período de 40 días collares MOONITOR® como forma de determinar la ubicación geográfica durante la actividad de pastoreo. El análisis de los datos correspondientes a los atributos de la pastura y del suelo se llevó a cabo en tres etapas: 1) análisis exploratorio de los datos a través de parámetros estadísticos clásicos (máximo, mínimo, media, DE y CV), 2) análisis de la estructura espacial mediante la construcción de semivariogramas y 3) interpolación mediante kriging. Para identificar las zonas más frecuentadas por los animales durante la actividad de pastoreo se formaron 6 categorías de disponibilidad de forraje de festuca en kgMS.ha⁻¹ (≤ 1000 , 1001-2000, 2001-3000, 3001-4000, 4001-5000 y ≥ 5001) en las cuales se contabilizó el número de visitas realizadas por los animales. El efecto de esta cantidad de forraje disponible no fue estadísticamente significativo sobre la frecuencia de visita de pastoreo animal para un nivel de significancia $\leq 0,05$. La biomasa disponible de festuca presentó una alta variabilidad dentro del área de estudio (CV = 49 %), incrementándose aún más a la salida de los animales (CV = 62 %). El CO total presentó un CV = 21 %, N total = 22 %, P-cítrico = 26 %, K = 30 %, Ca = 30 %, Mg = 28 %, Na = 41 %, pH = 3 %, CIC a pH₇ = 20 %, A. titulable = 15 %, BT = 28 %, SB = 10 %, CEa 0-30 cm = 42 %, arena = 18 %, limo = 34 % y arcilla = 37 %. El forraje disponible junto a aquellas propiedades del suelo correlacionadas significativamente con éste, no mostraron autocorrelación espacial significativa en el sitio de estudio. En consecuencia, no fue

posible delinear zonas homogéneas en función de éstas a las cuales aplicarle un manejo sitio específico basado en la grilla de muestreo de suelo utilizada.

Palabras clave: Variabilidad espacial; Biomasa disponible de festuca; Propiedades físico-químicas del suelo; Geoestadística.

8. SUMMARY

In pastoral systems there is often the presence of spatial variability in the attributes of the pasture, the soil, as well as the animal distribution in shepherd. The possibility to analyze, quantify and map out how the available biomass is distributed in this space, as well as the factors that affect it, could generate precise and objective information to budget the amount of available forage to feed the cattle. The main goals of this project were to quantify, analyze and map out the spatial variability in the availability of dry matter and some physical-chemical properties of the soil in a paddock on a pasture under a 5th year grazing of *Festuca arundinacea* (INIA Fortuna cv), located on the grounds of Unidad Alferéz. Also, we tried to identify the most frequented zones by the animals during the grazing. The experiment took place in Palo a Pique experimental unit from Estación Experimental del Este (UEPP) from the Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) located in the state of Treinta y Tres – Uruguay. Three 50*50m sampling grids were installed, subdivided in 10*16,6m rectangles in 8 paddocks of 1,2 ha each. Inside each one, forage samples were taken cutting at floor level before the entrance of the animals to the paddock and then immediately after they left, and we took samples of total OC, total N, P-citric, Ca, Mg, K, Na, pH, texture, CEC at pH₇, titratable acidity, total bases and base saturation at a depth of 0-15cm. Each sample was georeferenced through a Garmin eTrex Venture[®] HC GPS. Also, we determined the ECa at a depth of 0-30cm using the VERIS 3100[®] sensor. The grazing was based on the usage of 21 Aberdeen Angus steers. From these we selected 4 to which we put MOONITOR[®] collars for 40 days as a way to determine their geographical location during the grazing activity. The data analysis corresponding to the attributes of the grazing and the soil was carried out in three stages: 1) exploratory analysis of the data through classical statistical parameters (maximum, minimum, average, DE and CV), 2) analysis of the spatial structure through the construction of semivariograms and 3) interpolation through kriging. In order to identify the most frequented zones by the animals during the grazing activity we formed 6 categories of availability of forage of fescue in kgMS.ha⁻¹ (≤ 1000 , 1001-2000, 2001-3000, 3001-4000, 4001-5000 and ≥ 5001) in which we posted the number of visits made by the animals. The effect of this quantity of forage available was not statistically significant over the frequency of visits on the animal grazing for a level of significance $\leq 0,05$. The available fescue biomass presented a high variability inside the studied area (CV= 49 %), increasing even more at the exit of the animals (CV= 62 %). The total OC presented a CV of 21 %, total N = 22 %, P-citric = 26 %, K = 30 %, Mg = 28 %, Na=41 %, pH = 3 %, CEC at pH⁷ = 20 %, titratable acidity = 15 %, total bases = 28 %, base saturation = 10 %, ECa at 0-30cm = 42 %, sand = 18 %, silt = 34 % and clay = 37 %. The available forage together with those soil properties correlated significantly with it, did not show significant spatial autocorrelation on the studied site. In consequence, it was not possible to trace homogeneous zones according to these to apply a zone-specific management based on the used sampling grids on the soil.

Keywords: Spatial variability; Available fescue biomass; Soil physical-chemical

properties; Geostatistic.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Acevedo, E.; Martínez, E. 2003. Sistema de labranza y productividad de los suelos. In: Seminario Sustentabilidad en Cultivos Anuales (2003, Santiago). Cero labranza manejo de rastrojos. Santiago, Chile, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. pp. 13-25 (Serie Ciencias Agronómica no. 8).
2. Acosta, Y. M. 1994. Aspectos básicos del metabolismo del nitrógeno en rumiantes. In: Seminario de Actualización Técnica (1994, Colonia). Nitrógeno en pasturas. Montevideo, INIA. pp. 57-60 (Serie Técnica no. 51).
3. Adamsen, F. J.; Pinter, P. J.; Barnes, E. M.; LaMorte, R. L.; Wall, G. W.; Leavitt, S.; Kimball, B. A. 1999. Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop Science*. 39(3):719-724.
4. Adler, P. B.; Raff, D. A.; Lauenroth, W. K. 2001. The effect of grazing on spatial heterogeneity of vegetation. *Oecologia*. 128:465-479.
5. Álvarez, R.; Steinbach, H. 2006. Factores climáticos y edáficos reguladores el nivel de materia orgánica. In: Álvarez, R. ed. *Materia orgánica: valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 31-40.
6. Arango, L.; Jaramillo, D. F. 2016. Variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas de un Alfisol en el departamento de Antioquia. *Suelos Ecuatoriales*. 47:1-9.
7. Baethgen, W. E. 1994. Comentarios generales sobre el seminario “nitrógeno en pasturas”. In: Seminario de Actualización Técnica (1994, Colonia). Nitrógeno en pasturas. Montevideo, INIA. pp. 61-66 (Serie Técnica no. 51).
8. Bailey, D.; Gross, J.; Laca, E.; Rittenhouse, L.; Coughenour, M.; Swift, D.; Sims, P. 1996. Mechanisms that result in large herbivore grazing distribution patterns. *Journal of Range Management*. 49(5):386-400.
9. _____. 2005. Identification and creation of optimum hábitat conditions for livestock. *Rangeland Ecology and Management*. 58:109-118.
10. _____.; Provenza, F. D. 2008. Mechanisms determining large-herbivore distribution. In: Prins, H. H. T.; van Langevelde, F. eds. *Resource ecology: spacial and temporal dynamics of foraging*. Dordrecht, Springer. pp. 7-28.

11. Banco Mundial. 2013. Seguro de pasturas basado en el índice NDVI para productores ganaderos en el Uruguay. Estudio de factibilidad: informe final. (en línea). Montevideo, MGAP. OPYPA. 170 p. Consultado 17 feb. 2019. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/gestion-de-riesgos-y-seguros-agropecuarios/estudios-tecnicos/informe-factibilidad-ndvi-ganaderia>
12. Barbari, M.; Conti, L.; Koostra, B. K.; Masi, G.; Sorbetti Guerri, F.; Workman, S. R. 2006. The use of global positioning and geographical information systems in the management of extensive cattle grazing. *Biosystems Engineering*. 95(2):271-280.
13. Barbaro, L. A.; Karlanian, M. A.; Mata, D. A. s.f. Importancia del pH y de la conductividad eléctrica (CE) en los sustratos para plantas. Buenos Aires, Argentina, INTA. 12 p.
14. Barbazán, M.; Bautes, C.; Beux, L.; Bordoli, M.; Cano, J.; Ernst, O.; García, A.; García F.; Quincke, A. 2011. Fertilización potásica en cultivos bajo siembra directa en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia (Uruguay)*. 15(2):93-99.
15. Bauer, A.; Black, A. L. 1994. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. *Soil Science Society of America Journal*. 58(1):185-193.
16. Beckett, P. H. T.; Webster, R. 1971. Soil variability: a review. *Soils Fertilizers*. 34(1):1-15.
17. Bernardi, A. C. C.; Bettiol, G. M.; Ferreira, R. P.; Santos, K. E. L.; Rabello, L. M.; Inamasu, R. Y. 2016. Spatial variability of soil properties and yield of a grazed alfalfa pasture in Brazil. *Precision Agriculture*. 17(6):737-752.
18. _____; Grego, C. R.; Andrade, R. G.; Rabello, L. M.; Inamasu, R. Y. 2017. Spatial variability of vegetation index and soil properties in an integrated crop-livestock system. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 21(8):513-518.
19. Berreta, E. 2008. Aspectos de manejo en situaciones críticas de forraje. (en línea). *In: Alternativas tecnológicas para enfrentar situaciones de crisis forrajeras*. Montevideo, INIA. pp. 13-15. (Ediciones Especiales no. 27). Consultado 11 jun. 2020. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/UCTT/Sequ%C3%ADa/Selecci%C3%B3n%20RG%202015/Ganader%C3%ADa/Manejo%20forrajero/Aspectos%20de%20manejo%20de%20forraje.pdf>

20. Bertsch, B. M.; Thomas, G. W. 1985. Potassium status of temperate regions soils. In: Munson, R. D. ed. Potassium in agriculture. Madison, ASA/CSSA/SSSA. pp. 131-162.
21. Best, S.; León, L. 2006a. Análisis de datos. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E. C.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, IICA. pp. 145-161.
22. _____.; _____.; Claret, M. 2006b. Vitivinicultura y fruticultura. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E. C.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, IICA. pp. 55-64.
23. Bongiovanni, R.; Lowenberg-DeBoer, J. 2004. Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture*. 5(4):359-387.
24. Brase, T. 2006. Basic statistics. In: Precision Agriculture. New York, Thomson/Delmar. pp. 29-48.
25. Bracco, G.; Hernández, S. 2018. Relaciones entre diferentes métodos de estimación de fósforo lábil en suelos de la cuenca del río Santa Lucía y su implicancia en las recomendaciones de fertilización. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 109 p.
26. Briggs, C. A. D.; Busacca, A. J.; McDaniel, P. A. 2006. Pedogenic processes and soil-landscape relationships in North Cascades National Park, Washington. *Geoderma*. 137:192-204.
27. Brizuela, M. A.; Cid, M. S.; Cibils, A. F. 2015. Interacción planta-animal en el contexto de sistemas productivos desarrollados en distintos ambientes ecológicos. In: Congreso Internacional de Producción Animal Especializada en Bovinos (1º., 2015, Cuenca). Trabajos presentados. Cuenca, Universidad de Cuenca. Facultad Ciencias Agropecuarias. pp. 49-73.
28. Brosh, A. Goldberg, S.; Asher, A.; Yosef, A. B.; Yehuda, Y.; Gorelik, H.; Malanud, R.; Gat, A. 2018. Cows collars and herd management system for remote managing of grazing beef herd. In: International Symposium on the Nutrition of Herbivores (10th., 2018, Clermont-Ferrand). Proceedings. Clermont-Ferrand, Animal Consortium. s.p.
29. Burgess, T. M.; Webster, R. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. *Journal of Soil Science*. 31(2):315-331.

30. Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Journal of Soil Science Society of America*. 58(5):1501-1511.
31. _____; Karlen, D. L. 1999. Spatial Analysis of Soil Fertility Parameters. *Precision Agriculture*. 1:5-14.
32. Cantou, G.; Terra, J. 2012. Evolución de las propiedades químicas del suelo en sistema de agricultura forrajera (2006-2012). *In: Jornada Anual Unidad Uxperimental Palo a Pique (2012, Treinta y Tres). Trabajos presentados*. Montevideo, INIA. pp. 63-70 (Actividades de Difusión no. 695).
33. Carámbula, M.; Bermúdez, R.; Ayala, W.; Carriquiry, E. 1997. Campo natural: variables básicas que permiten fijar pautas para su manejo. *In: Jornada Anual de Producción Animal (1997, Treinta y Tres). Trabajos presentados*. Montevideo, INIA. pp. 5-13 (Actividades de Difusión no. 136).
34. _____. 2003. Pasturas y forrajes: insumos, implantación y manejo de pasturas. Montevideo, Hemisferio Sur. v.2, 371 p.
35. Carter, M. R. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal*. 94(1):38-47.
36. Carvalho, P. C. F; Gonda, H. L.; Wade, M. H.; Mezzalira, J. C.; Amaral, M.F.; Gonçalves, E. N.; Santos, D. T.; Nadin, L.; Poli, C. H. E. C. 2008. Características estruturais do pasto e o consumo de forragem: o que pastar, quanto pastar e como se mover para encontrar o pasto. *In: Simpósio sobre Manejo Estratégico da Pastagem (4°), Simposio Internacional sobre Produção Animal em Pastejo (2°, 2008, Viçosa). Trabalhos apresentados*. Viçosa, UFV. pp. 101-130.
37. Cid, M. S.; Brizuela, M. A. 1998. Heterogeneity in tall fescue pastures created and sustained by cattle grazing. *Journal of Range Management*. 51(6):644-649.
38. Clark, I. 1979. *Practical Geostatistics*. Londres, Elsevier. 141 p.
39. Coitiño-López, J.; Barbazán, M.; Ernst, O. 2015. Conductividad eléctrica aparente para delimitar zonas de manejo en un suelo agrícola con reducida variabilidad en propiedades físico-químicas. *Agrociencia (Uruguay)*. 19(1):102-111.

40. Cook, P. G.; Walker, G. R. 1992. Depth profiles of electrical conductivity from linear combinations of electromagnetic induction measurements. *Soil Science Society of America Journal*. 56:1015-1022.
41. Corwin, D. L.; Loague, K.; Ellsworth, T. R. 1999. Introduction: Assessing non-point source pollution in the vadose zone with advanced information technologies. In: Corwin, D. L.; Loague, K.; Ellsworth, T. R. eds. *Assessment of Non-point Source Pollution in the vadose zone*. Washington, D. C., American Geophysical Union. pp. 1-20 (Geophysical Monograph no. 180).
42. _____.; Lesch, S. M. 2003a. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: theory, Principles, and Guidelines. *Agronomy Journal*. 95(3):455-471.
43. _____.; _____.; Shouse, P. J.; Soppe, R.; Ayars, J. E. 2003b. Identifying Soil Properties that Influence Cotton Yield Using Soil Sampling Directed by Apparent Soil Electrical Conductivity. *Agronomy Journal*. 95:352-364.
44. _____.; _____.; Oster, J. D.; Kaffka, S. R. 2006. Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma*. 131:369-387.
45. Coughenour, M. B. 1991. Spatial components of plant-herbivore interactions in pastoral, ranching and native ungulate ecosystems. *Journal of Range Management*. 44(6):530-542.
46. Cox, M. S.; Gerard, P. D.; Melinda, A. J. 2006. Selected soil properties variability and their relationships with yield in three Mississippi fields. *Soil Science*. 171(7):541-551.
47. David, M. 1977. *Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Amsterdam, Elsevier. 384 p.
48. De Carvalho, J. R. P.; da Silveira, P. M.; Vieira, S. R. 2002. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 37(8):1151-1159.
49. Delhomme, J. P. 1978. Kriging in Hydrosiences. *Advances in Water Resources*. 1(5):251-266.
50. _____. 1979. Spatial variability and uncertainty in groundwater flow parameters: a geostatistical approach. *Water Resources Research*. 15(2):269-280.

51. Dennis, S. J.; Taylor, A. L.; O'Neill, K.; Clarke-Hill, W.; Dynes, R. A.; Cox, N.; Van Koten, C.; Jowett, T. W. D. 2015. Pasture yield mapping: why and how. *Journal of New Zealand Grasslands*. 77:41-46.
52. Díaz, R. s.f. Desafíos de la intensificación agrícola en el Uruguay. (en línea). s.n.t. 5 p. Consultado 23 jun. 2019. Disponible en <http://repiica.iica.int/docs/B0399e/B0399e.pdf>
53. Díaz Falú, E. M.; Brizuela, M. Á.; Cid, M. S.; Cibils, A. F.; Cendoya, M. G.; Bendersky, D. 2014. Daily feeding site selection of cattle and sheep co-grazing a heterogeneous subtropical grassland. *Livestock Science*. 161:147-157.
54. Drissi, R.; Goutouly, J. P.; Forget, D.; Gaudillere, J. P. 2009. Nondestructive measurement of grapevine leaf area by Ground Normalized Difference Vegetation Index. *Agronomy Journal*. 101(1):226-231.
55. Dumont, B.; Garel, J. P.; Ginane, C.; Decuq, F.; Farrugia, A.; Pradel, P.; Rigolt, C.; Petit, M. 2007. Effect of cattle grazing a species-rich mountain pasture under different stocking rates on the dynamics of diet selection and sward structure. *Animal* 1(7):1042-1052.
56. Durán, A.; Zamalvide, J. P.; García, F. Hill, M. s.f. Propiedades físico químicas de los suelos. Montevideo, Facultad de Agronomía. 60 p.
57. _____; Califra, A.; Molfino, J. H. 1999. Suelos del Uruguay según soil taxonomy. Montevideo, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 15 p.
58. Ettema, C.; Wardle, A. 2002. Spatial soil ecology. *Trends in Ecology and Evolution*. 17(4):177-183.
59. Faber, A. C. 2012. Estructura espacial y selectividad de parches en pasturas de festuca alta pastoreadas a diferente altura remanente. Tesis Magister en Ciencias Agrarias opción Ciencias Animales. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 96 p.
60. Farahani, H. J.; Flynn, R. L. 2007. Map Quality and Zone Delineation as affected by Width of Parallel Swaths of Mobile Agricultural Sensors. *Precision Agriculture*. 96(2):151-159.
61. Fisher, E.; Thornton, B.; Hudson, G.; Edwards, A. C. 1998. The variability in total and extractable soil phosphorus under a grazed pasture. *Journal of Plant and Soil*. 203(2):249-255.
62. Formoso, F. 2010. *Festuca arundinacea*: manejo para la producción de forraje y semilla. Montevideo, Uruguay. 192 p. (Serie Técnica no. 182).

63. Fu, W.; Zhao, K.; Jiang, P.; Ye, Z.; Tunney, H.; Zhang, C. 2013. Field-scale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements. *Soil Research*. 51(6):503-512.
64. García, F.; Picone, L.; Ciampitti, A. 2014. Fósforo. In: Echeverría, E.; García, F. eds. *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Buenos Aires, INTA. pp. 229-264.
65. García, J.; Formoso, F.; Risso, D.; Arrospide, C.; Ott, P. 1981. Productividad y estabilidad de praderas. *Miscelánea CIAAB*. no. 29:1-23.
66. Gibb, M. J. 1998. Animal grazing: intake terminology and definitions. (en línea). In: Workshop on Pasture Ecology and Animal Intake (8th., 1996, Dublin). *Proceedings*. Dublin, Ireland, s.e. pp. 21-35. Consultado 23 feb. 2019. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/264845385_Animal_grazing_intake_terminology_and_definitions
67. Giraldo, H. R. 2003. Definiciones básicas de geoestadística. In: *Introducción a la geoestadística: teoría y aplicación*. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. pp. 17-20.
68. Golluscio, R. A.; Deregibus, V. A.; Paruelo, J. M. 1998. Sustainability and range management in the Patagonian steppes. *Ecología Austral*. 8:265-284.
69. Gómez Suárez, M. 1998. Análisis de la variabilidad espacial de las propiedades generales, elementos nutritivos y metales pesados en el suelo. Tesis Doctoral. La Coruña, España. Universidad de la Coruña. Facultad de Ciencias. Área de Edafología y Química Agrícola. 273 p.
70. González, M. A. 1998. Propiedades hidrodinámicas en zona no saturada y sus relaciones con los procesos hidrológicos. Tesis Doctoral. La Coruña, España. Universidad de Santiago de Compostela. Escuela Politécnica Superior. 288 p.
71. Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York, Oxford University. 483 p.
72. _____. 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*. 89:1-45.
73. Gorandi, E. R.; Moltoni, A. F.; Clemares, N. 2016. Desarrollo y evolución de un sistema de monitoreo animal georreferenciado para ganadería de precisión. (en línea). In: Congreso Argentino de Ingeniería (3^o.), Congreso de Enseñanza de la Ingeniería (9^o., 2016, Resistencia). Trabajos presentados. Resistencia, Argentina, s.e. s.p. Consultado 25 jul. 2019. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/316478235_Desarrollo_y_evalu

[acion de un sistema de monitoreo animal georreferenciado para ganaderia de precision](#)

74. Grohs, D. S.; Bredemeier, C.; Mundstock, C. M.; Poletto, N. 2009. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. *Engenharia Agrícola*. 29(1):101-112.
75. Guo, Y.; Amundson, R.; Gong, P.; Yu, Q.; 2006. Quantity and spatial variability of soil carbon in the conterminous United States. *Soil Science of American Journal*. 70:590-600.
76. Gutiérrez, M. V.; Cadet, E.; Rodríguez, W.; Araya, J. M. 2011. El GreenSeeker TM y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. *Agronomía Mesoamericana*. 22(2):397-403.
77. Herken, G.; Olano, I.; Ruete, R. 2019. Sobrevivencia estival y dinámica de cultivares de *Festuca Arundinacea* con inclusión del hongo endófito AR584. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 78 p.
78. Herrera, O. A. 2018. Comportamiento en pastoreo del ganado bovino criollo argentino y Aberdeen angus ecopito riojano, en pastizales naturales del chaco árido. Tesis MSc. en Producción Animal. Balcarce, Argentina. Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ciencias Agrarias. Área de Sistemas de Producción Animal. 94 p.
79. Hill, M. J.; Vickery, P. J.; Furnival, E. P.; Donald, G. E. 1999. Pasture land cover in Eastern Australia from NOAA-AVHRR NDVI and classified landsat TM. *Remote Sensing of Environment*. 67(1):32-50.
80. Hirata. M.; Fukuyama, K. 1997. Dynamics of the horizontal distribution of herbage mass in a bahiagrass (*Paspalum notatum* Flüggé) pasture with grazing by cattle. *Grassland Science*. 43(1):1-6.
81. _____. 2002. Herbage availability and utilisation in small-scale patches in a bahia grass (*Paspalum notatum*) pasture under cattle grazing. *Tropical Grasslands*. 36(1):13-23.
82. Hobbs, N. T. 1996. Modification of ecosystems by ungulates. *The Journal of Wildlife Management*. 60(4):695-713.
83. Hodgson, J. 1990. *Grazing management: science into practice*. London, Longman. 203 p.
84. Holben, B. N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*. 7(11):1395-1416.

85. Inman, D.; Khosla, R.; Mayfield, T. 2005. On-the-go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. *Sensor Review*. 25(3):209-214.
86. Jabro, J. D.; Stevens, W. B.; Evans, R. G.; Iversen, W. M. 2010. Spatial variability and correlation of selected soil. *Soil and Water Division*. 26(3):419-428.
87. Johnson, C. K.; Doran, J. W.; Wienhold, B. J.; Shanahan, J. F. 2001. Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. *Soil Science Society American Journal*. 65(6):1829-1837.
88. Johnson, L. F.; Roczen, D. E.; Youkhana, S. K.; Nemani, R. R.; Bosch, D. F. 2003. Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*. 38(1):33-44.
89. Journel, A. G.; Huijbregts, C. H. 1978. *Mining Geostatistics*. New York, Academic Press. 600 p.
90. _____. 1986. *Geostatistics, Models and Tools for the Earth Sciences*. *Mathematical Geology*. 18(1):119-140.
91. Justice, C. O.; Eck, T. F.; Tanré, D.; Holben, B. N. 1991. The effect of water vapour on the NDVI derived for the Sahelian region from NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*. 12(6):1165-1188.
92. Kachanoski, R. G.; Gregorich, E. G.; Van Wesenbeeck, I. J. 1988. Estimating spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic inductive methods. *Canadian Journal of Soil Science*. 68(4):715-722.
93. Kariuki, S. K.; Zhang, H.; Schroder, J. L.; Hanks, T.; Payton, M.; Morris, T. 2009. Spatial Variability and Soil Sampling in a Grazed Pasture. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 40:1674-1687.
94. Kilic, K.; Kilic, S.; Kocyigit, R. 2012. Assessment of spatial variability of soil properties in areas under different land use. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 18(5):722-732.
95. Kitchen, N. R.; Sudduth, K. A.; Myers, D. B.; Drummond, S. T.; Hong, S. Y. 2005. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture*. 46:285-308.
96. Kumar, R.; Silva, L. 1973. Light ray tracing through a leaf cross-section. *Applied Optics*. 12(12):2950-2954.
97. Laca, E. A.; Lemaire, G. 2000. Measurement sward structure. In: Marnette, L.; Jones, R. M. eds. *Field and Laboratory Methods for Grassland and*

Animal Production Research. Wallingford, CAB International. pp. 103-121.

98. _____. 2009a. New approaches and tools for grazing management. *Rangeland Ecology Management*. 62:407-417.
99. _____. 2009b. Precision livestock production: tools and concepts. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 38:123-132.
100. Lan, Y.; Zhang, H.; Lacey, R.; Hoffmann, W. C.; Wu, W. 2009. Development of an integrated sensor and instrumentation system for measuring crop conditions. *Agricultural Engineering International. The CIGR E-Journal*. 11:1-16.
101. Lara, B.; Gandini, M. 2016. Caracterización del comportamiento fenológico de las coberturas vegetales en un sector de la Pampa deprimida (Argentina): una aproximación utilizando series temporales de NDVI. *Ambiência Guarapuava*. 12(4):765-783.
102. Larrea, G. E. 2019. Disponibilidad y variabilidad espacial de calcio, magnesio y potasio en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana. Tesis Magister en Producción Vegetal. Balcarce, Argentina. Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ciencias Agrarias. 81 p.
103. Launchbaugh, K. L.; Howery, L. D. 2005. Understanding landscape use patterns of livestock as a consequence of foraging behavior. *Rangeland Ecology & Management*. 58(2):99-108.
104. Lomillos, J.; Alonso, M.; García, J.; Gaudioso, V. 2016. Estudio del comportamiento social del ganado de Lidia empleando tecnología GPS-GPRS. *Abanico Veterinario*. 6(3):35-46.
105. Loza, H. J. 1993. Manejo de praderas y carga animal. Monterrey, México, Universidad Autónoma de Nuevo León. 17 p. (Reporte Técnico no. 11).
106. Ma, B. L.; Dwyer, L. M.; Costa, C.; Cober, E. R.; Morrison, M. J. 2001. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. *Agronomy Journal*. 93(6):1227-1234.
107. McBride, R. A.; Gordon, A. M.; Shrive, S. C.; 1990. Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*. 54(1):290-293.
108. McCormick, S.; Jordan, C.; Bailey, J. 2009. Within and between-field spatial variation in soil phosphorus in permanent grassland. *Precision Agriculture*. 10(3):262-276.

109. Mannetje, L. 2000. Measuring biomass of grassland vegetation. *In*: Mannetje, L. 't; Jones, R. M. eds. *Field and Laboratory Methods for Grassland and Animal Production Research*. Wallingford, CAB International. pp. 151-177.
110. Mantovani, E. C.; de Carvalho Pinto, F.; Marçal de Queiroz, D. 2006. Introducción a la agricultura de precisión. *In*: Bongiovanni, R.; Mantovani, E. C.; Best, S.; Roel, A. eds. *Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo, IICA. pp. 13-22.
111. MAP. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1979. Carta de reconocimientos de suelos del Uruguay: descripción de suelos. Montevideo. t. 3, 452 p.
112. Martínez, E. H.; Fuentes, J. P. E.; Acevedo, E. H. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. 8(1):68-96.
113. Matheron, G. 1963. Principles of Geostatistics. *Economic Geology*. 58(8):1246-1266.
114. Melchiori, R. J.; García, F. O.; Echeverría, H. E. 2001. Variabilidad espacial en algunas propiedades del suelo: I asociación con las variaciones en el rendimiento del trigo. Paraná, Entre Ríos, INTA Paraná. 4 p.
115. MGA. CIAAB (Ministerio de Ganadería y Agricultura. Centro de Investigaciones Agrícolas "Alberto Boerger", UY). 1971. Fertilización de pasturas. Montevideo, CIAAB. 40 p. (Boletín de Divulgación no. 5).
116. Monteith, J. L.; Unsworth, M. H. 2008. *Principles of environmental physics*. 4th ed. Cambridge, United States, Academic Press. 440 p.
117. Morales, L. A. 2004. Análisis estadísticos y geostadísticos en diferentes estudios de algunas propiedades de un suelo bajo cultivo de arroz. Tesis Doctoral. La Coruña, España. Universidad de la Coruña. Facultad de Ciencias. Área de Edafología y Química Agrícola. 483 p.
118. Morón, A. 1992. El fósforo en el sistema suelo planta. *Revista INIA Investigación Agropecuaria*. 1:45-60.
119. _____. 1994. El ciclo del nitrógeno en el sistema suelo-planta-animal. *In*: Seminario de Actualización Técnica (1994, Colonia). Nitrógeno en pasturas. Montevideo, INIA. pp. 1-12 (Serie Técnica no. 51).
120. Mulla, D. J.; McBratney, A. B. 2002. Soil spatial variability. *In*: Warrick, A. W. ed. *Soil Physics Companion*. Boca Raton, FL, CRC. pp. 343-370.

121. Myers, D. E. 1991. Interpolation and estimation with spatially located data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 11(3):209-228.
122. Nelson, D. W.; Sommer, L. E. 1982. Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter. *In*: Page, A. L.; Miller, R. H.; Keeney, D. R. eds. *Methods of Soil Analysis*. 2nd. ed. Madison, WI, ASA/SSSA. pt. 2, pp. 595-579.
123. Newman, J. 2007. Herbivory. *In*: Stephens, D. W.; Brown, J. S.; Ydenberg, R. C. eds. *Foraging: behavior and Ecology*. Chicago, University of Chicago. pp. 175-220.
124. Novellie, P. A. 1978. Comparison of the foraging strategies of blesbok and springbok on the Transvaal highveld. *South African Journal of Wildland Research*. 8(4):137-144.
125. Obando, F. H.; Villegas, A. M.; Betancur, J. H.; Echeverri, L. 2006. Variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un Typic Udivitrands, arenoso de la región andina central colombiana. *Revista Facultad Nacional de Agronomía (Medellín)*. 59(1):3217-3235.
126. O'Regain, P. J.; Schwartz, J. 1995. Dietary selection and foraging strategies of animals on rangeland. Coping with spatial and temporal variability. *In*: Journet, M.; Grenet, E.; Farce, M. H.; Theriez, M.; Demarquilly, C. eds. *Recent developments in the nutrition of herbivores*. Paris, INRA. pp. 407-423.
127. Osorio, W. 2003. Eficiencia y efectividad de la fertilización en la agricultura de Colombia: manejo integral de la fertilidad del suelo. Bogotá, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. pp. 177-210.
128. Paggi, M. V.; Peralta, N.; Calandroni, M.; Costa, J. L. 2011. Relación espacial entre la conductividad eléctrica aparente del suelo medida con sensores de contacto y no contacto en un suelo del sudeste bonaerense. *In*: Taller Nacional de Cartografía Digital (1º., 2011, Villa de Merlo). Trabajos presentados. Villa de Merlo, AACCS. pp. 1-16.
129. Paz- González, A.; Gómez, M. J.; Taboada, M. T. 1996. Análisis geoestadístico de las propiedades generales de un suelo de cultivo. *Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales*. 11(1):133-160.
130. _____; Taboada, M. T.; Vieira, S. R. 2001. Geostatistical analysis of heavy metals in a one-hectare plot under natural vegetation in a serpentine area. *Canadian Journal of Soil Science*. 81:469-479.
131. Pellegrini, A. E. 2017. Potasio calcio y magnesio del suelo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 13 p.

132. Perdomo, C.; Barbazán, M. 1999. Nitrógeno. Montevideo, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 74 p.
133. Pereyra, F. 2019. Inclusión de endófitos AR584 y efecto sobre productividad forrajera de *Festuca arundinacea* y performance de novillos. Tesis Magister en Ciencias Agrarias opción Ciencias Animales. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 48 p.
134. Pérez, L. E. 2018. Superando las limitaciones del NVDI. (en línea). s.n.t. s.p. Consultado 4 mar. 2019. Disponible en <https://acolita.com/superando-las-limitaciones-del-ndvi/>
135. Petersen, R. G.; Lucas, H. L.; Woodhouse, W. W. 1956. The distribution of excreta by freely grazing cattle and its effect on pasture fertility: I. Excretol distribution. *Agronomy Journal*. 48(10):440-444.
136. Pieper, R. D. 1994. Ecological implications of livestock grazing. *In*: Pieper, R. D.; Vavra, M.; Laycock, W. A. eds. Ecological implications of herbivory in the west. Littleton, CO, Society for Range Management. pp. 177-211.
137. Pratt, P.; Bair, F. 1962. Cation-exchanges properties of some acid soils of California. *Hilgardia*. 33(13):689-706.
138. Pravia, M. I.; Montossi, F.; Gutiérrez, D.; Ayala, W.; Andregnette, B.; Invernizzi, G.; Porcile, V. 2013. Estimación de la disponibilidad de pasturas y forrajes en predios de GIPROCAR II: ajuste del “Rising plate meter” para las condiciones de Uruguay. *In*: Montossi, F. ed. Invernada de precisión: pasturas, calidad de carne, genética, gestión empresarial e impacto ambiental (GIPROCAR II). Montevideo, INIA. pp. 31-65 (Serie Técnica no. 211).
139. Pravia, M. V. 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espacio-temporal en la investigación de cultivos agrícolas: A) Impacto de prácticas de manejo de suelos y atributos del terreno en la productividad de sorgo a escala de chacra. B) Simulación de la producción de arroz en Uruguay utilizando el modelo DSSATv4 CERES-Rice. Tesis Magíster en Ciencias Agrarias, opción Ciencias del Suelo. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 113 p.
140. Quincke, A.; Bermúdez, R.; Cuadro, R.; Giorello, D. 2019. Introducción y metodología general. *In*: Quincke, A.; Cuadro, R. eds. Fertilización de pasturas de leguminosas: resultados para el manejo del fósforo y el azufre. Montevideo, INIA. pp. 1-13 (Serie Técnica no. 248).

141. Rabuffetti, A. 2017a. Acidez y alcalinidad de suelos. *In*: La fertilidad del suelo y su manejo. Montevideo, Hemisferio Sur. v. 1, pp. 199-272.
142. _____. 2017b. Calcio y magnesio. *In*: La fertilidad del suelo y su manejo. Montevideo, Hemisferio Sur. v. 2, pp. 615-626.
143. Ramaje, C. H.; Eby, C.; Mather, R. E.; Purvis, E. R. 1958. Yield and chemical composition of grasses fertilized heavily with nitrogen. *Agronomy Journal*. 50:59-62.
144. Rhoades, J. D. 1993. Electrical Conductivity Methods for Measuring and Mapping Soil Salinity. *Advances in Agronomy*. 49: 201-251.
145. _____.; Corwin, D. L.; Lesch, S. M. 1999. Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. *In*: Corwin, D. L.; Loague, K.; Ellsworth, T. R. eds Assessment of non-point source pollution in the vadose zone. Washington, D. C., American Geophysical Union. pp. 197-215 (Geophysical Monograph no. 180).
146. Robert, P. C. 1999. Precision Agriculture: an Information Revolution in Agriculture. *In*: Agricultural Outlook Forum (1999, Arlington). Proceedings. Arlington, USDA. pp. 529-535.
147. Robinson, G.; Whalley, R.; Taylor, J. 1983. The effect of prior history of superphosphate application and stocking rate on faecal and nutrient distribution on grazed natural pastures. *Australian Rangeland Journal*. 5(2):79-82.
148. Rucks, L.; García, F.; Kaplán, A.; Ponce de León, J.; Hill, M. 2004. Propiedades físicas del Suelo. Montevideo, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 68 p.
149. Samper, F. J.; Carrera, J. 1990. Geoestadística: aplicaciones a la hidrología subterránea. Barcelona, CIMNI. 484 p.
150. Sanchez, J. E.; Harwood, R. R.; Willson, T. C.; Kizilkaya, K.; Smeenk, J.; Parker, E.; Paul, E. A.; Knezek, B. D.; Robertson, G. P. 2004. Managing soil carbon and nitrogen for productivity and environmental quality. *Agronomy Journal*. 96(3):769-775.
151. Sawyer, J.; Mallarino, A. 1999. Differentiating and Understanding the Mehlich 3, Bray, and Olsen Soil Phosphorus Tests. (en línea). *In*: Annual Crop Pest Management Short Course (19th., 1999, St. Paul, Minnesota). Proceedings and Presentations. St. Paul, MN, USA. s.p. Consultado 25 set. 2019. Disponible en <http://www.agronext.iastate.edu/soilfertility/presentations/mbotest.pdf>

152. Schellberg, J.; Hill, M. J.; Gerhards, R.; Rothmund, M.; Braun, M. 2008. Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. *European Journal of Agronomy*. 29:59-71.
153. Schlecht, E.; Hülsebusch, C.; Mahler, F.; Becker, K. 2004. The use of differentially corrected global positioning system to monitor activities of cattle at pasture. *Applied Animal Behaviour Science*. 85:185-202.
154. Schnyder, H.; Locher, F.; Auerswald, K. 2010. Nutrient redistribution by grazing cattle drives patterns of topsoil N and P stocks in a low-input pasture ecosystem. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 88(2):183-195.
155. Scott, W. R. 1981. Nutrición de la planta y “ciclaje” de nutrientes. *In*: Langer, R. H. M. ed. *Las pasturas y sus plantas*. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 185-208.
156. Senft, R. L.; Coughenour, M. B.; Bailey, D. W.; Rittenhouse, L. R.; Sala, O. E.; Swift, D. M. 1987. Large Herbivore Foraging and Ecological Hierarchies. *BioScience*. 37(11):789-799.
157. Serrano, J. M.; Peça, J. O.; Marques da Silva, J. R.; Shahidian, S. 2010. Mapping soil and pasture variability with an electromagnetic induction sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*. 73:7-16.
158. Sheets, K. R.; Hendrickx, J. M. H.; 1995. Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction. *Water Resources Research*. 31(10):2401-2409.
159. Shi, Z.; Wang, K.; Bailey, J.; Jordan, C.; Higgins, A. 2000. Sampling strategies for mapping soil phosphorus and soil potassium distributions in cool temperate grassland. *Precision Agriculture*. 2(4):347-357.
160. _____; _____; _____; _____; _____. 2002. Temporal changes in the spatial distributions of some soil properties on a temperate grassland site. *Soil Use and Management*. 18:353-362.
161. Sickel, H.; Ihse, M.; Norderhaug, A.; Sickel, M. A. K. 2004. How to monitor semi-natural key habitats in relation to grazing preferences of cattle in mountain summer farming areas. *Landscape and Urban Planning*. 67:67-77.
162. Simón, M.; Peralta, N.; Costa, J. L. 2013. Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Ciencia del Suelo*. 31(1):45-55.

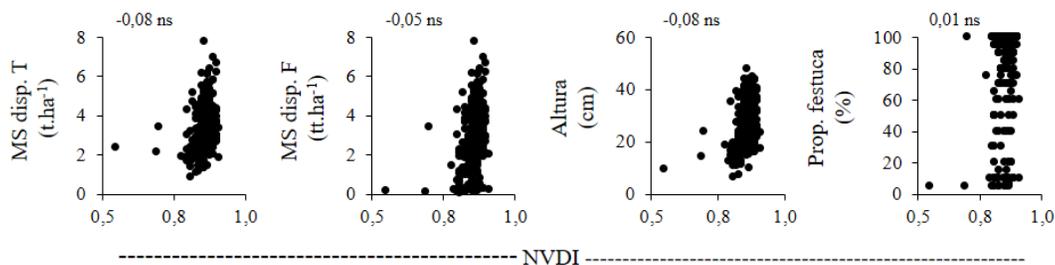
163. Soufflet, V.; Tanré, D.; Begue, A.; Podaire, A.; Deschamps, P. Y. 1991. Atmospheric effects on NOAA AVHRR data over Sahelian regions. *International Journal of Remote Sensing*. 12(6):1189-1203.
164. Souza, L. S.; Cogo, N.; Vieira, S. R. 1997. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 21(3):367-372.
165. Stafford Smith, M. 1988. Modeling: three approaches to predicting how herbivore impact is distributed in rangelands. (en línea). Las Cruces, New Mexico State University. Agricultural Experiment Station. 56 p. (Research Report no. 628). Consultado 25 set. 2019. Disponible en <http://contentdm.nmsu.edu/cdm/ref/collection/AgCircs/id/53637>
166. Stamatiadis, S.; Taskos, D.; Tsadila, E.; Christofides, C.; Tsadilas, C.; Schepers, J. S. 2010. Comparison of passive and active canopy sensors for the estimation of vine biomass production. *Precision Agriculture*. 11(3):306-315.
167. Starr, J. L.; Parkin, T. B.; Meisinger, J. J. 1995. Influence of sample size on chemical and physical soil managements. *Journal of Soil Science Society of America*. 59:713-719.
168. Stuth, J. W. 1991. Foraging behavior. (en línea). In: Heitschmidt, R. K.; Stuth, J. W. eds. *Grazing Management: an ecological perspective*. Portland, Timber. pp. 65-84. Consultado 23 feb. 2018. Disponible en <https://cnrit.tamu.edu/rlem/textbook/Chapter3.htm>
169. Su, Y.-Z.; Wang, F.; Suo, D.-R.; Zhang, Z.-H.; Du, M.-W. 2006. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil carbon sequestration and soil fertility under the wheat–wheat–maize cropping system in northeast China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 75:285-295.
170. Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Wiebold, W. J., Batchelor, W. D., Bollero, G. A., Bullock, D. G., Clay, D. E., Palm, H. L.; Pierce, F. J.; Schuler, R. T.; Thelen, K. D. 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture*. 46:263-283.
171. Szymula, J. P. V. 2014. Análisis de la evolución de sequías con metodologías de teledetección. Tesis MSc. en Ingeniería de los Recursos Hídricos. Santa Fe, Argentina. Universidad Nacional del Litoral. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. 107 p.

172. Tardáguila, J.; Barragán, F.; Yanguas, R.; Diago, M. P. 2008 Estimación de la variabilidad del vigor del viñedo a través de un sensor óptico lateral terrestre. *Vida Rural*. 271:30-36.
173. Taylor, J. A.; Robinson, G. G.; Hedges, D. A.; Whalley, R. D. B. 1987. Camping and faeces distribution by Merino sheep. *Applied Animal Behaviour Science*. 17:273-288.
174. Trangmar, B. B.; Yost, R. S.; Uehara, G. 1985. Application of Geostatistics to Spatial Studies of Soil Properties. *Advances in Agronomy*. 38:45-94.
175. Trotter, M.; Guppy, C.; Haling, R.; Trotter, T.; Edwards, C.; Lamb, D. 2014. Spatial variability in pH and key soil nutrients: is this an opportunity to increase fertiliser and lime-use efficiency in grazing systems? *Crop and Pasture Science*. 65(8):817-827.
176. Ungar, E. D.; Henkin, Z.; Gutman, M.; Dolev, A.; Genizi, A.; Ganskopp, D. 2005. Inference of Animal Activity From GPS Collar Data on Free-Ranging Cattle. *Rangeland Ecology & Management*. 58(3):256-266.
177. Valentine, K. A. 1947. Distance from water as a factor in grazing capacity of rangeland. *Journal of Forestry*. 45:749-754.
178. Vallentine, J. 1990. Spatial patterns in grazing. In: *Grazing management*. San Diego, Academic Press. pp. 55-75.
179. Verhulst, N.; Govaerts, B.; Fuentes Ponce, M. 2010. Sensor portátil GreenSeeker™ para la medición del índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI): una herramienta para la evaluación integral de las prácticas agronómicas. México, D. F., CIMMYT. 16 p.
180. Veris Technologies, US. 2014. Frequently asked questions about soil electrical conductivity. (en línea). Salina, Kansas. s.p. Consultado 20 feb. 2019. Disponible en <https://www.veristech.com/the-sensors/v3100>
181. Vieira, S. R. 2000. Geoestadística em estudos de variabilidade espacial do solo. *Tópicos em Ciencia do Solo*. 1:1-54.
182. _____; Millete, J.; Topp, G. C.; Reynolds, W. D. 2002. Handbook for geoestatistical analysis of variability in soil and climate data. *Tópicos em Ciencia do Solo*. 2:1-45.
183. Wagner, R. E. 1954. Influence of legume and fertilizer nitrogen on forage production. *Agronomy Journal*. 46:167-171.
184. Wallis de Vries, M. F.; Daleboudt, C. 1994. Foraging strategy of cattle in patchy grassland. *Oecologia*. 100:98-106.

185. Wander, M. M.; Walter, G. L.; Nissen, T. M.; Bollero, G. A.; Andrews, S. S.; Cavanaugh-Grant, D. A. 2002. Soil quality: science and process. *Agronomy Journal*. 94(1):23-32.
186. Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. *In*: Hillel, D. ed. *Applications of soil physics*. New York, Academic Press. pp. 319-344.
187. Webster, R.; Oliver, M. A. 2007. Introduction. *In*: Barnett, V.; Senn, S.; Scott, M. eds. *Geostatistics for environmental scientists*. 2nd. ed. Chichester, West Sussex, Wiley. pp. 1-8.
188. Whitehead, D. C. 2000. *Nutrient elements in grassland: soil-plant-animal relationships*. Cambridge, CABI. 369 p.
189. Williams, B. G.; Hoey, D. 1987. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils. *Australian Journal of Soil Research*. 25(1):21-27.
190. Wollenhaupt, N. C.; Mulla, D. J.; Gotway, C. A. 1997. Soil Sampling and Interpolation Techniques for Mapping Spatial Variability of Soil Properties. *In*: Pierce, F. J.; Sadler, E. J. eds. *The State of Site Specific Management for Agriculture*. Madison, WI, American Society Agronomy. pp. 19-53.
191. Xu, J.; Webster, R. 1984. A geostatistical study of topsoil properties in Zhangwu county, China. *Catena*. 11(1):13-26.
192. Yost, R. S.; Uehara, G.; Fox, R. L. 1982. Geostatistical Analysis of Soil Chemical Properties of Large Land Areas. I. Semi-variograms. *Soil Science Society of America Journal*. 46(5):1028-1032.
193. Zamalvide, J. P. 1992. Dinámica de fósforo en los suelos con especial referencia a la disponibilidad en rotaciones de cultivos y pasturas. *Revista INIA Investigación Agropecuaria*. 1:85-93.

10. ANEXOS

Anexo No. 1. Correlación entre atributos medidos sobre la BD y el NVDI

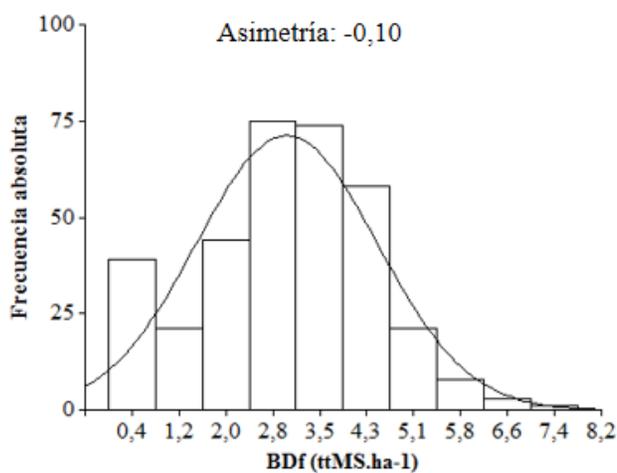


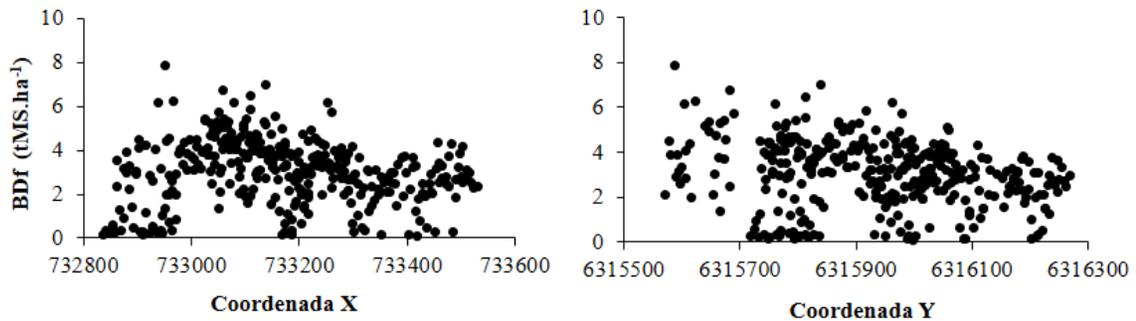
Anexo No. 2. Matriz de correlación de Pearson entre atributos de calidad y la BD

Variable	MS total (-----tMS.ha ⁻¹ -----)	MS festuca	PC	FDA	FDN	Cenizas
MS total	1					
MS festuca	0,89	1				
PC	-0,46	-0,3	1			
FDA	0,55	0,42	-0,75	1		
FDN	0,68	0,66	-0,59	0,81	1	
Cenizas	-0,23	-0,17	0,48	-0,17	-0,17	1

■ Correlación altamente significativa $p \leq 0,01$ □ Correlación significativa $p \leq 0,05$

Anexo No. 3. Comprobación de supuestos de normalidad y estacionaridad para la BD





Anexo No. 4. Correlación de Pearson entre la BDF y los atributos del suelo no correlacionados significativamente

Variable	CEa 30cm (mS.m ⁻¹)	P citrico (µg P.g ⁻¹)	K (---meq.100g ⁻¹ ---)	Na	SB (%)	pH -	Arena (----- % -----)	Limo	Arcilla
BDF (ttMS.ha⁻¹)	-0,15	-0,09	0,05	-0,18	0,1	-0,16	-0,18	0,09	0,05
p-valor	0,24	0,55	0,73	0,23	0,53	0,29	0,22	0,56	0,74

Anexo No. 5. Comprobación de supuestos de normalidad y estacionaridad para los atributos del suelo correlacionados significativamente con la BDF

