

**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL
SUELO Y SU INLUENCIA EN EL RENDIMIENTO DE MAÍZ BAJO
MANEJO CONSERVACIONISTA**

DERLIS ENCISO SANTACRUZ

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción, como requisito para obtención del título de *Magíster en Scientiae en Ciencias del Suelo y Ordenamiento Territorial*. Programa de Postgrado fortalecido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Universidad Nacional de Asunción
Facultad de Ciencias Agrarias
Dirección de Posgrado
San Lorenzo, Paraguay

2019

**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL
SUELO Y SU INLUENCIA EN EL RENDIMIENTO DE MAÍZ BAJO
MANEJO CONSERVACIONISTA**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: FÍSICA DE SUELO

DERLIS ENCISO SANTACRUZ

COMITÉ ASESOR DE TESIS

Orientador: Prof. Ing. Agr. (Dr.) Juan José Bonnin Acosta.

Co-Orientador: Prof. Ing. Agr. (Dr.) Jimmy Walter Rasche Álvarez

Co-Orientador: Prof. Ing. Agr. (M.Sc.) Rubén Franco Ibars

Universidad Nacional de Asunción

Facultad de Ciencias Agrarias

Dirección de Posgrado

San Lorenzo, Paraguay

2019

Universidad Nacional de Asunción
Facultad de Ciencias Agrarias
Dirección de Posgrado

**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL
SUELO Y SU INLUENCIA EN EL RENDIMIENTO DE MAÍZ BAJO
MANEJO CONSERVACIONISTA**

Esta tesis fue aprobada por la Mesa Examinadora como requisito parcial para optar por el del título de *Magíster en Scientiae en Ciencia del Suelo y Ordenamiento Territorial*. Programa de Postgrado fortalecido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), otorgado por la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción.

Autor: Derlis Enciso Santacruz

Miembros del Comité Asesor:

Prof. Ing. Agr. (Dr.) Juan José Bonnin Acosta (Orientador).

Prof. Ing. Agr. (Dr.) Jimmy W. Rasche Alvarez (Coorientador)

Prof. Ing. Agr. (M.Sc.) Rubén Franco Ibars (Coorientador)

Miembros de la Mesa Examinadora

Prof. Ing. Agr. (Dr.) Juan José Bonnin Acosta (Orientador).

Prof. Ing. Agr. (Dr.) Jimmy W. Rasche Alvarez (Coorientador)

Prof. Ing. Agr. (M.Sc.) Rubén Franco Ibars (Coorientador)

Prof. Ing. Agr. (Dr.) Ursino Federico Barreto Riquelme (Especialista Invitado)

San Lorenzo, 17 de Diciembre del 2019

DEDICATORIA

Con mucho cariño, respeto y admiración dedico este trabajo:

A mi madre, Valeria Santacruz (†);

A mi hermana, Blanca G. Enciso Santacruz y

A mi ahijada; Valeria Mercado Enciso.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, Valeria Santacruz, quien en vida me dio la fortaleza y el apoyo incondicional para mi formación profesional y por haberme inculcado los mejores valores.

A mi hermana Blanca G. Enciso Santacruz por ser mi soporte y por estar siempre a mi lado dándome la fuerza para no flaquear en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi profesor y orientador Prof. Ing. Agr. (Dr.) Juan José Bonnin Acosta, agradezco por guiarme en la elaboración de este trabajo, por la paciencia, por todos los conocimientos transmitidos, por siempre estar disponible para responder mis dudas y cuyas correcciones ayudaron sustancialmente el desarrollo de este trabajo.

Al Prof. Ing. Agr. (Dr.) Jimmy W. Rasche Alvarez y al Prof. Ing. Agr. (M.Sc.) Rubén Franco Ibars, por brindar tiempo y conocimiento para la elaboración de este trabajo.

A la Cooperativa Volendam Ltda., por apoyar la elaboración de este trabajo, proveyendo el área de estudio, alojamiento y transporte interno durante el desarrollo de la investigación a campo.

Al Ing. Agr. Pedro Viveros por el apoyo y buena predisposición para la realización de los trabajos a campo de esta investigación

A mis compañeros de curso de la Maestría en Ciencias de Suelo y Ordenamiento Territorial, quienes estuvieron apoyando para la realización de este trabajo, en especial a Alder Duarte Monzón, Eugenio González, Laura R. Quiñonez Vera y Ulises Riveros.

Al plantel docente de la Maestría en Ciencias de Suelo y Ordenamiento Territorial, por todo el apoyo y conocimientos que me transmitieron.

A la coordinación de la Maestría en Ciencias de Suelo y Ordenamiento Territorial, por estar siempre pendiente de los estudiantes y apoyo constante para el cumplimiento académico del curso de Maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo y fortalecimiento del curso de la de la Maestría en Ciencias de Suelo y Ordenamiento Territorial.

Al programa de incentivo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), dentro del marco fortalecimiento de maestrías, por brindarnos el soporte económico necesario para cumplir con todo los requerimientos académicos.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y SU INFLUENCIA EN EL RENDIMIENTO DE MAÍZ BAJO MANEJO CONSERVACIONISTA

Autor: DERLIS ENCISO SANTACRUZ

Orientador: Prof. Ing. Agr. (Dr.) JUAN JOSÉ BONNIN ACOSTA

Co-Orientador: Prof. Ing. Agr. (Dr.) JIMMY W. RASCHE ALVAREZ

Co-Orientador: Prof. Ing. Agr. (M.Sc.) RUBÉN FRANCO IBARS

RESUMEN

La producción agrícola tiene relación directa con las propiedades físicas del suelo, y para optimizar el manejo y sustentabilidad productiva del suelo es importante conocer la distribución espacial de las propiedades físicas. El objetivo de esta investigación fue analizar la distribución espacial de algunas propiedades físicas del suelo y su influencia en el rendimiento de maíz bajo manejo conservacionista. La investigación se realizó en dos etapas: en la primera se evaluó la distribución espacial de la Resistencia Mecánica a la Penetración del Suelo (RMPS) del suelo en las profundidades de 0-10; 10-20; 20-30; 30-40 y mayor a 40 cm, en diez parcelas con diferentes superficies, con al menos 30 puntos de muestreo por parcela, totalizando 349 ha bajo estudio. En la segunda etapa, en una parcela con 31 ha se evaluó la distribución espacial de RMPS, Densidad Aparente (D_{Ap}); porosidad total del suelo (PP); humedad del suelo (Hg); Velocidad de Infiltración (I) y rendimiento de granos (RG), las primeras cinco variables fueron evaluadas en las profundidades de 0-10; 10-20 y 20-30 cm. Los puntos de muestreo se distribuyeron en forma sistematizada (100 m x 100 m.), totalizando 390 y 37 puntos para la primera y segunda etapa del estudio respectivamente. Los datos obtenidos fueron sometidos a estadística descriptiva, análisis de correlación y análisis geoestadístico. Las parcelas presentan niveles altos de RMPS (RMPS > 2 MPa), D_{Ap} (D_{Ap}>1,5 g.cm⁻³) y mayor contenido de humedad (Hg>10%), con niveles bajos de PP y de I en las capas superficiales (0 a 20 cm de profundidad), con una distribución heterogénea. El RG presenta en un 75% del Área de Estudio (AE) valores superiores a 6.500 kg.ha⁻¹, valores que se distribuyen más homogéneamente en relación a la distribución espacial de las propiedades físicas del suelo, observándose una ligera disminución de RG en relación a las áreas compactadas (RMPS >2MPa), (D_{Ap}>1,5 g.cm⁻³) y (PP< 45%).

Palabras clave: compactación, siembra directa, degradación del suelo, manejo del suelo.

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ALGUMAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E SUA INLUÊNCIA NO PRODUÇÃO DE MILHO SOB GESTÃO DA CONSERVAÇÃO

Autor: DERLIS ENCISO SANTACRUZ

Orientador: Prof. Ing. Agr. (Dr.) JUAN JOSÉ BONNIN ACOSTA

Co-Orientador: Prof. Ing. Agr. (Dr.) JIMMY W. RASCHE ALVAREZ

Co-Orientador: Prof. Ing. Agr. (M.Sc.) RUBÉN FRANCO IBARS

RESUMO

A produção agrícola está diretamente relacionada às propriedades físicas do solo, para otimizar sua gestão e sustentabilidade produtiva é importante conhecer sua distribuição espacial. O objetivo deste trabalho foi analisar a distribuição espacial de algumas propriedades físicas do solo sob manejo conservacionista e sua influência ao produtividade de grãos (GR). A pesquisa foi realizada em duas etapas: na primeira, foi avaliada a distribuição espacial da Resistência mecânica à Penetração do Solo (RMPS) do solo nas profundidades de 0-10; 10-20; 20-30; 30-40 e maior que 40cm, em dez parcelas com diferentes superfícies, totalizando 349 ha em estudo. No segundo, foi avaliada a distribuição espacial da resistência mecânica à penetração do solo (RMPS); Densidade aparente (DAP); porosidade do solo (P); umidade do solo (Hg); Velocidade de infiltração (I) e produção de grãos de milho (RG), as cinco primeiras variáveis foram avaliadas nas profundidades de 0-10; 10-20 e 20-30 cm. Em uma das parcelas com 31 ha. Os pontos amostrais foram distribuídos sistematicamente (100 m x 100 m), totalizando 390 e 37 pontos para a primeira e segunda etapa do estudo, respectivamente. Os dados obtidos foram submetidos à estatística descritiva e análise geoestatística. As parcelas apresentam altos teores de RP (RMPS > 2MPa), DAP (DAP > 1,5 g.cm⁻³) e maior teor de umidade (Hg > 10%), com baixos teores de P e I em ninhadas superficiais (0 a 20cm de profundidade), com distribuição heterogênea. O RG apresenta 75% dos valores de AE maiores que 6.500 kg.ha⁻¹, valores que se distribuem de forma mais homogênea em relação à distribuição espacial dos atributos físicos do solo, observando-se um ligeiro decréscimo no GR em relação às áreas compactadas (RMPS > 2 MPa), (DAP > 1,5 g.cm⁻³) e (PP < 45%).

Palavras-chave: compactação, plantio direta, degradação do solo, manejo do solo.

SPATIAL DISTRIBUTION OF SOME PHYSICAL PROPERTIES OF THE SOIL AND ITS INFLUENCE IN THE PERFORMANCE ON CORN ON CONSERVATION MANAGEMENT

Author: DERLIS ENCISO SANTACRUZ

Advisor: Prof. Ing. Agr. (Dr.) JUAN JOSÉ BONNIN ACOSTA

Co- Advisor: Prof. Ing. Agr. (Dr.) JIMMY W. RASCHE ALVAREZ

Co- Advisor: Prof. Ing. Agr. (M.Sc.) RUBÉN FRANCO IBARS

ABSTRACT

Agricultural production is directly related to the physical properties of the soil, to optimize its management and productive sustainability it is important to know its spatial distribution. The objective of this work was to analyze the spatial distribution of some physical properties of the soil and its influence on corn yield on conservation management. The investigation was carried out in two stages: in the first one, the spatial distribution of the Penetration Resistance (RMPS) of the soil in the depths of 0-10 was evaluated; 10-20; 20-30; 30-40 and larger than 40cm, in ten plots with different surfaces, totaling 349 ha under study. In the second, the spatial distribution of Mechanical Resistance to soil penetration (RMPS) was evaluated; Apparent Density (Dap); soil porosity (PP); soil moisture (Hg); Infiltration rate (I) and grain yield (RG), the first five variables were evaluated at depths of 0-10; 10-20 and 20-30cm. In one of the plots with 31 ha. The sampling points were distributed systematically (100 m x 100 m.), Totaling 390 and 37 points for the first and second stage of the study respectively. The data obtained were subjected to descriptive statistics and geostatistical analysis. The plots have high levels of RP (RMPS > 2MPa), DAp (DAp > 1.5 g.cm⁻³) and higher moisture content (Hg > 10%), with low levels of P and I in surface litters (0 to 20cm deep), with a heterogeneous distribution. The GR presents 75% of the AE values greater than 7,500 kg.ha⁻¹, values that are distributed more homogeneously in relation to the spatial distribution of the physical attributes of the soil, observing a slight decrease in RG in relation to the compacted areas (RMPS > 2MPa), (Dap > 1.5 g.cm⁻³) and (P < 45%).

Keywords: Compaction, Direct Sowing, Soil degradation, Soil management.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Portada.....	i
DEDICATORIA iv	
AGRADECIMIENTOS v	
RESUMEN vi	
RESUMO vii	
ABSTRACT viii	
TABLA DE CONTENIDOS ix	
LISTAS DE TABLAS xi	
LISTA DE FIGURAS xiii	
LISTA DE ANEXOS xvi	
1. INTRODUCCIÓN 1	
2. REVISIÓN DE LITERATURA 3	
2.1 Cultivo de maíz 3	
2.2 Propiedades físicas del suelo relacionadas al desarrollo del cultivo de maíz 4	
2.2.1 Textura y estructura del suelo5	
2.2.2 Porosidad del suelo7	
2.1.3 Densidad del suelo7	
2.1.4 Resistencia mecánica a la penetración del suelo10	
2.1.5 Velocidad de infiltración de agua en el suelo12	
2.3 Variabilidad espacial 14	
3. MATERIALES Y METODOS 17	
3.1 Localización de la experimentación 17	
3.3 Descripción de las variables evaluadas 21	
3.3.1 Resistencia Mecánica la Penetración del Suelo21	
3.3.2 Densidad aparente del suelo21	
3.3.3 Porosidad total22	
3.3.4 Contenido de agua en el suelo22	

3.3.5 Velocidad de infiltración del agua en el suelo	23
3.3.6 Rendimiento de granos	23
3.4 Método de control de calidad de los datos	24
3.5 Métodos de análisis e interpretación	24
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
4.1. Primera Etapa	27
4.1.1. Estadística descriptiva de la resistencia mecánica a la penetración del suelo	27
4.1.2. Análisis geoestadístico de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS)	32
4.1.3. Mapas de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo.	34
4.2. Segunda Etapa	46
4.2.1 Estadística descriptiva de las variables físicas del suelo	46
4.2.2 Correlación existente entre las variables físicas del suelo con el rendimiento de granos de maíz	50
4.2.2 Análisis geoestadístico de las variables físicas del suelo	52
4.2.3 Mapas de distribución espacial de las propiedades físicas del suelo	53
5. CONCLUSIONES	60
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
7. ANEXO	68

LISTAS DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Relación general entre densidad aparente del suelo y crecimiento radicular, en base a la textura del suelo	11
Tabla 2 Rangos de velocidad de infiltración en diferentes texturas del suelo (Brouwer et al. 1988)	14
Tabla 3 Superficie (ha) y Puntos de muestreo de las diez parcelas evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018	20
Tabla 4 Parámetros estadísticos de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) de las parcelas 1, 2 y 3 a diferentes niveles de profundidad. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	27
Tabla 5 Parámetros estadísticos de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) de las parcelas 4 y 5 a diferentes niveles de profundidad. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	28
Tabla 6 Parámetros estadísticos de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) de las parcelas 6 y 7 a diferentes niveles de profundidad. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	29
Tabla 7 Parámetros estadísticos de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) de las parcelas 8, 9 y 10 a diferentes niveles de profundidad. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	30
Tabla 8 Parámetros de los modelos de semivariogramas para la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) de las diferentes profundidades de las diez parcelas evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	33
Tabla 9 Parámetros de los modelos de semivariogramas para la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) de las diferentes profundidades de las diez parcelas evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018 (Continuación)	34

Tabla 10	Parámetros estadísticos de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS); Densidad aparente del suelo (DAp); Porosidad total del suelo (PP); Contenido de humedad (Hg); en tres profundidades diferentes, Velocidad de infiltración del agua (I) y Rendimiento de Granos (RG). Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018	47
Tabla 11	Correlación de Pearson existente entre las variables de Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS), densidad aparente del suelo (Dap), porosidad total del suelo (PP), contenido de humedad (Hg), velocidad de infiltración del agua (I) con el rendimiento de granos de maíz (RG). Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018	51
Tabla 12	Parámetros de los modelos de semivariogramas para la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS); Densidad Aparente del suelo (Dap); Porosidad total del suelo (PP); Contenido de humedad (Hg); Textura (t) (% de arena, limo y arcilla) en las profundidades estudiadas; Velocidad de infiltración del agua (I), y Rendimiento de Granos (RG). Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018	53

LISTA DE FIGURAS

	Página	
Figura 1	Variación de la curva de velocidad de infiltración por la textura del suelo	13
Figura 2	Ubicación del área de estudio (AE) en el mapa del Paraguay.	17
Figura 3	Datos de precipitación mensual registrada en el Distrito de Villa del Rosario, Dpto. San Pedro, durante el periodo de investigación (Enero 2018 a junio 2018), proveído por la Cooperativa Volendam. 2019.	18
Figura 4	Datos promedios de contenido de agua en suelo (%) durante la evaluación de la Resistencia Mecánica a Penetración del suelo (RMPS), de las diez parcelas evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018	19
Figura 5	Imagen satelital del área de estudio (AE), ubicada en propiedades de la Coop. Volendam, Distrito Villa del Rosario, Dpto. de San Pedro, Paraguay, 2018. Fuente: Google Earth..	20
Figura 6	Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (Mpa), de la Parcela 1 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	36
Figura 7	Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (Mpa), de la Parcela 2 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	37
Figura 8	Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (Mpa), de la Parcela 3 en las diferentes profundidades	39

	evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	
Figura 9	Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (Mpa), de la Parcela 4 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	40
Figura 10	Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (Mpa), de la Parcela 5 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	41
Figura 11	Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (Mpa), de la Parcela 6 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018	43
Figura 12	Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (Mpa), de la Parcela 7 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	43
Figura 13	Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (Mpa), de la Parcela 8 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	44
Figura 14	Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (Mpa), de la Parcela 9 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	45
Figura 15	Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (Mpa), de la Parcela 10 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	46

Figura 16	Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (Mpa), Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	56
Figura 17	Mapa de distribución espacial de la Densidad Aparente del suelo (Dap) (g.cm-3), Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	57
Figura 18	Mapa de distribución espacial de la Porosidad total del suelo (PP) (%), Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	58
Figura 19	Mapa de distribución espacial del Contenido de Humedad (Hg) (%), Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	58
Figura 20	Mapa de distribución espacial la Velocidad de infiltración del agua en el suelo (I) (cm.h-1), Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	60
Figura 21	Mapa de distribución espacial del Rendimiento de granos (RG) de maíz, en kg.ha-1. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	61

LISTA DE ANEXOS

	Página
A1 Datos de precipitación por día (mm), registrada en el año 2018 (periodo de la investigación). En el Distrito de Villa del Rosario, Dpto. San, proveído por Cooperativa Volendam 2019.	71
A2 Datos de contenidos de agua en el suelo (%), durante la medición de RMPS de las diez parcelas evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	71
A3 Delimitación de las áreas bajo estudio de la primera etapa de la investigación. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018	74
A4 Delimitación y distribución de puntos de muestreo en el Área de Estudio (AE) de la segunda etapa de la investigación. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018	74
A5 Determinación de la variable Resistencia Mecánica a la Penetración del Suelo (RMPS). Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	75
A6 Muestreo de suelo en diferentes profundidades para la determinación de las variables Densidad aparente, porosidad total, humedad y textura del suelo. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	76
A7 Determinación de la variable velocidad de infiltración del agua en el suelo. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	76
A8 Determinación de la variable rendimiento de granos de maíz. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.	76

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura en los últimos años ha venido creciendo de manera exponencial, buscando producir alimento para satisfacer las demandas a nivel mundial, esto trae consigo el uso intensivo de los recursos naturales, principalmente los recursos suelo-agua. Estos recursos son empobrecidos, contaminados, deteriorados causando problemas para la sustentabilidad del sistema productivo.

El cultivo de maíz es uno de los rubros de importancia a nivel nacional, tanto para lo económico como así también en lo social, donde representa una fuente alimentaria bastante importante, por lo que su producción se extiende de manera exponencial, siendo uno de los rubros con mayor área de producción.

La producción del maíz, y de cualquier otro cultivo, tiene una relación directa con las propiedades físicas del suelo, en ese sentido, muchos estudios demuestran que en suelo bajo manejo conservacionista, los atributos físicos del suelo son alterados negativamente, afectando de esta manera el rendimiento del maíz.

La compactación es uno de los problemas físicos más comunes de los suelos agrícolas, donde la misma afecta directamente al proceso nutricional de los cultivos, afectando de esta manera al rendimiento de los cultivos, esto se explica en que la compactación, afecta negativamente a la circulación de nutrientes, aguas y al desarrollo del sistema radicular, de esta manera se reduce la capacidad productiva de los cultivos, sufriendo deficiencias hídricas, nutricionales, etc.

Un suelo bien estructurado, con buena aireación (sin compactación), favorece al crecimiento radicular y a la dinámica del aire, del agua y los nutrientes que son fundamentales para el desarrollo de las plantas.

En ese sentido Rucks *et al.* (2004), sostienen que, si las partículas del suelo están muy próximas, como sucede en un suelo compactado, no quedan poros grandes para la aireación. En cambio, si un suelo está bien agregado tendrá suficientes macroporos entre los agregados para una mejor circulación del aire, el agua, nutrientes, adecuada para el crecimiento vegetal.

Además es importante reconocer que el manejo de suelos compactados se ve limitado principalmente por el costo que genera, sin embargo en la actualidad, una de las alternativas para disminuir el costo de producción, es mediante el análisis de la variabilidad espacial de este problema y a través de programas de sistemas de información geográficas (SIG), es posible localizar con precisión los lugares compactados, y en base a esta información georeferenciado, es factible realizar un manejo localizado de la compactación del suelo, lo que aumenta la eficiencia de la labor y reduce el costo de manejo del suelo.

Teniendo en cuenta todos los problemas que genera la degradación física del suelo, al sistema suelo-agua-planta. El objetivo general de esta investigación fue de analizar la distribución espacial de algunas de las propiedades físicas del suelo y su influencia en el rendimiento del maíz bajo manejo conservacionista y como objetivos específicos; determinar la resistencia mecánica del suelo a la penetración, densidad aparente del suelo, el porcentaje de porosidad, velocidad de infiltración del agua, contenido de agua en el suelo y rendimiento de maíz.

Con esta investigación, se beneficia a los productores agrícolas de la zona, teniendo en cuenta que se podrá identificar los principales problemas físicos de los suelos agrícolas de la zona. Los resultados de esta investigación representan una base para la toma de decisiones en los manejos agronómicos, con el fin de mejorar la producción, la rentabilidad de los cultivos y la sustentabilidad del sistema.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Cultivo de maíz

El maíz (*Zea mays*), representa uno de los cultivos más importante del mundo, es uno de los cereales más cultivada y consumida en casi todo el mundo, su importancia radica principalmente es sus propiedades nutritivas tanto para ser el humano como para los animales. A nivel país, el maíz es muy consumido por las familias, por lo que mejorar el rendimiento de este cultivo es una necesidad urgente (Ortigoza *et al.* 2019).

El maíz es considerado como uno de los principales fuentes de energía para los rumiantes, confinados o suplementados, responsable de aproximadamente 70 % de energía y 24% de proteínas en las raciones, además se puede utilizar en la producción animal como silaje de la planta entera, silaje de los granos húmedos, granos secos, espigas y planta entera seca (Borghini 2001).

La superficie sembrada en los últimos tres años fue aumentando en el país (2017, 2018 y 2019), registrándose en promedio 853.637 ha de superficie cultivada. El rendimiento de la producción nacional del maíz alcanzó un promedio de 4.625 kg.ha⁻¹, en el período 2010/2018, donde el menor rendimiento se registró en zafra 2012 con 3.950 kg.ha⁻¹, y el mayor en la zafra 2017 con 5.500 kg.ha⁻¹ (CAPECO, 2019).

2.2 Propiedades físicas del suelo relacionadas al desarrollo del cultivo de maíz

Las propiedades físicas del suelo son extremadamente importantes para la producción de maíz, a pesar de que este cultivo se caracteriza por tener un sistema radicular con un alto potencial de desenvolvimiento, ante la presencia de alteraciones físicas del suelo, pueden dificultar la penetración de las raíces y consecuentemente limitar el aprovechamiento de los nutrientes y agua disponibles en el suelo (Lima 2007).

Además es importante saber que la condición física de un suelo, determina, la rigidez, la fuerza de sostenimiento y no solo para la facilidad de la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, y la retención de nutrientes, por lo tanto los atributos físicos del suelo influyen en el crecimiento de las plantas (Rucks *et al.* 2004).

Es también importante destacar, que el manejo del suelo, es un factor preponderante que influye en las alteraciones físicas del suelo, Gomes *et al.* (2008), quienes evaluaron la variabilidad espacial de la Resistencia Mecánica a la Penetración del Suelo (RMPS), en los sistema de siembre directa (SD) y sistema convencional (SC), observaron que en el SD los niveles más altos de RMPS (1,2 MPa), se concentran en las capas superficiales (a partir de los 5 cm), sin embargo en el SC, observaron que los niveles más altos de RMPS (1,2 MPa), se presentan a partir de los 25 cm

Ortigoza *et al.* (2019), mencionan que el suelo ideal para que el cultivo de maíz presente su óptimo desarrollo, requiere de textura franco a franco-arcilloso, además deben ser bien drenados y aireados, al ser éste uno de los cultivos menos tolerantes a la baja difusión de aire en el suelo.

El preparo del suelo también tiene una influencia directa sobre las propiedades físicas del suelo y en consecuencias en la productividad del cultivo, en ese sentido, Deperon *et al.* (2016), evaluaron la influencia de la preparación del suelo en las propiedades físicas del suelo y de los aspectos agronómicos del cultivo de maíz, donde observaron que los implementos utilizados para la preparación influenciaron en la densidad aparente del suelo (DAp) y porosidad total en la capa de 0 a 10 cm, y la

resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) fue influenciado hasta los 30 cm de profundidad. Observando también que a partir de los 1,5 Ma de RMPS redujo la materia seca y el rendimiento de granos del maíz y los valores por encima de los 2 MPa redujo la materia seca de las raíces.

Schaffath *et al.* (2008), también establecen que la preparación o el manejo del suelo es el principal causante de las degradaciones físicas, sin embargo estos autores también establecen que esas degradaciones también pueden ser influenciados por los cultivos adoptados, las características propias del suelo, por los factores y procesos formadores del suelo.

Por su parte Goedert *et al.* (2002), Kiliç *et al.*: (2004) y Megda *et al.* (2008), consideran que uno de los problemas físicos que más afecta a la producción de maíz, es la compactación, estableciendo que la misma aumenta la resistencia mecánica del crecimiento radicular, reduce la aireación y la disponibilidad de agua y nutrientes, retarda la emergencia de las semillas y en consecuencia reduce el rendimiento del cultivo.

2.2.1 Textura y estructura del suelo

La textura del suelo representa una de las propiedades físicas del suelo que se relaciona con el desarrollo del cultivo de maíz, en este sentido es importante destacar que la textura del suelo, determina de forma indirecta la porosidad del suelo, la densidad que a su vez se relaciona con la disponibilidad de nutrientes, agua en el suelo, y el desarrollo del sistema radicular, Rosolem *et al.* (1999), realizaron un estudio para determinar el desarrollo del sistema radicular en suelos con diferentes porcentajes de arcilla, donde pudieron constatar que a medida que aumentaba el tenor de arcilla causaba disminución en el número de raíces seminales adventicias del cultivo de maíz.

La textura del suelo es una propiedad física del suelo que expresa el contenido porcentual de las partículas; arena, limo y arcilla en conjunto (Excluyendo piedra y grava). La textura del suelo se puede estimar directamente a campo (Textura al tacto) pero en trabajos de investigación y clasificación de suelos se determina mediante el triángulo textural (Hang 2014).

El contenido porcentual de arena, limo y arcilla, no pueden ser alterados y determina en gran medida el valor económico de la zona, esto se debe a que los suelos con mayor contenido de arcilla en función a sus propiedades químicas o físicas son mejores para fines agrícolas una vez que la distribución del tamaño de los poros interfiere directamente en el grado de compactación, disponibilidad de agua entre otros (Klein 2008).

Los tres tipos diferentes de partículas de suelo difieren en su tamaño, esto a su vez, presenta una influencia en la capacidad de retención de nutrientes del suelo. En este sentido, la arcilla, puede retener más nutrientes que la arena y por lo tanto es capaz de liberar más nutrientes para las plantas (FAO 2015).

Según Curt (2006), la textura condiciona el comportamiento del suelo en cuanto a la aireación, drenaje, capacidad de retención de agua, facilidad de laboreo y para su determinación se puede utilizar lo propuesto por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América (USDA), que considera los siguientes intervalos de diámetro de partículas que corresponden a cada fracción y son: entre 2,0 a 0,05 mm para arena, limo entre 0,05 a 0,002 mm y menor a 0,002 mm para las arcillas.

Según la misma fuente, tanto la estructura como la textura del suelo tiene relación directa con la retención del agua en el suelo, el agua es el componente elemental que afecta la estructura del suelo con mayor importancia debido a su solución, precipitación de minerales y sus efectos en el crecimiento de las plantas.

La estructura del suelo y su estabilidad juegan un rol fundamental en muchos procesos del suelo y su interacción con las plantas: erosión, infiltración de agua, exploración radicular, aireación y resistencia mecánica, por lo tanto, todas las prácticas agronómicas deberían hacerse con carácter de conservación de la misma (Rucks *et al.* 2004).

Los mis autores, afirman que la estabilidad de los agregados se refiere a la resistencia que los mismos tienen a desintegrarse o romperse frente a la acción del agua y manipulación mecánica (Laboreo), esto es un factor muy importante en afectar

la estabilidad de la estructura es el contenido de agua que hay en el suelo ya que determina el grado en que las fuerzas mecánicas causan destrucción en la estructura.

2.2.2 Porosidad del suelo

De acuerdo con Rucks *et al.* (2004), unas de las propiedades edáficas que está relacionada directamente con el desarrollo radicular de las plantas es la porosidad, que está determinada por las características cuantitativas y cualitativas del espacio del suelo no ocupado por sólidos (Macroporos y microporos).

Así mismo, es importante saber que el almacenamiento y retención de agua en el suelo, como así también la disponibilidad de nutrientes están fuertemente relacionado con la porosidad del suelo, esta propiedad por lo general es alterada por las prácticas agrícolas (Lima 2007).

Las raíces necesitan agua y oxígeno para poder desarrollarse y además debe existir un espacio poroso adecuado entre las partículas del suelo por el que puedan ir creciendo (Glinski y Lipiec 1990). Los sistemas edáficos con cualidades más apropiados para la producción agrícola presentan una mezcla de microporos y macroporos, donde los macroporos sirven para aireación, entrada de agua y el drenaje, los microporos para el almacenamiento del agua (Brammer 2000).

Lima (2007), en este sentido evaluó la productividad del maíz en función a las propiedades físicas del suelo bajo sistema de siembra directa, observando una relación inversa entre la productividad del maíz y el contenido de microporosidad, es decir, donde observó mayor contenido de microporos del suelo, se presentó menor productividad.

2.1.3 Densidad del suelo

La densidad del suelo es una propiedad que define la calidad de la estructura del suelo, por lo que las alteraciones en sus valores indican el grado de modificación que sufre la estructura del suelo, esto es debido específicamente a la relación que existe entre la densidad y la porosidad del suelo (Doran *et al.* 1994).

La densidad del suelo, es una de las propiedades físicas que más afecta al desarrollo del cultivo, por lo que su estudio y manejo es bastante importante para mejorar el desarrollo y productividad del cultivo, en este sentido, Santos de Andrade *et al.* (2005), establece que entre todas las propiedades físicas que afecta el manejo de irrigación y el desarrollo de los cultivos, la principal es la densidad del suelo.

Por otro lado, Souza *et al.* (1997), establece de manera general, para la mayoría de los cultivos, independientemente de la textura, son afectados cuando los valores de la densidad pasa los $1,5 \text{ g.m}^{-3}$, estableciendo que en estos valores, baja considerablemente el contenido de oxígeno en el suelo para la respiración de las raíces, a causa del bajo contenido de poros y mal drenaje, sumando a esto también que estos niveles favorece el impedimento mecánico para el crecimiento de las raíces, limitando la absorción de agua y de nutrientes.

La densidad del suelo comúnmente expresan valores más altos en suelos sometidos a cultivos continuos, esto se debe principalmente al exceso tránsito de maquinarias agrícolas, causando compactación del suelo, lo que se traduce en valores altos de densidad del suelo (Frazão 1981 citado por Santos de Andrade *et al.* 2005).

Taboada y Álvarez (2008), afirman que los valores de la densidad aparente difieren entre suelos, ya que varían con la textura, contenido de materia orgánica y por el manejo, dificultando la posibilidad de comparar la densidad aparente entre suelos distintos.

Rucks *et al.* (2004), mencionan que la densidad aparente se puede determinar mediante muestras imperturbadas, y la misma es utilizada para relacionar el peso seco ($105 \text{ }^\circ\text{C}$) de la muestra del suelo y el volumen que esa muestra ocupaba en el suelo.

Una densidad aparente alta indica un suelo compacto o tenor elevado de partículas granulares como la arena, sin embargo, una densidad aparente baja no indica necesariamente un ambiente favorecido para el crecimiento de las plantas (FAO 2017). Porta *et al.* (2003), coinciden con esta afirmación, sosteniendo que la densidad aparente tiene un papel fundamental desde el punto de vista del manejo del suelo ya que indica el grado de compactación de cada horizonte e infiere dificultando la emergencia, el enraizamiento y la circulación del agua.

En este sentido, varios autores, entre ellos Beltrame *et al.* (1981); Borges *et al.* (1999) y Castro (1995), realizaron trabajos de investigación que mostraron la existencia de una relación directa entre la compactación del suelo y la densidad de la misma.

Reinert *et al.* (2001) propusieron como valores críticos de densidad de suelo aproximadamente $1,45 \text{ g.m}^{-3}$ para suelos con horizontes de textura arcillosa (Más de 55% de arcilla), $1,55 \text{ g.m}^{-3}$ para suelos con horizontes de textura media (Arcilla entre 20 a 55%) y de $1,65$ a $1,55 \text{ g.m}^{-3}$ para suelos con textura arenosa (Menos de 20 % de arcilla).

De esta manera, Arshad *et al.* (1996) citado por el USDA (1999), afirman que la densidad aparente del suelo puede servir como un indicador de la compactación y de las restricciones al crecimiento de las raíces, dicha relación entre densidad aparente del suelo y crecimiento radicular, en base a la textura del suelo se encuentra en la Tabla 1. Típicas densidades aparentes del suelo fluctúan entre $1,0$ y $1,7 \text{ g.m}^{-3}$ y generalmente aumentan con la profundidad en el perfil.

Tabla 1. Relación general entre densidad aparente del suelo y crecimiento radicular, en base a la textura del suelo.

Textura del suelo	Densidades aparentes ideales (g.cm^{-3})	Densidades aparentes que pueden afectar el Crecimiento radicular (g.cm^{-3})	Densidades aparentes que restringen el crecimiento radicular (g.cm^{-3})
Areno, areno-franco	< 1,60	1,69	>1,80
Franco-arenosa, franco	< 1,40	1,63	>1,80
Franco-arcilla-arenosa, franco, franco-arcillosa	< 1,40	1,60	> 1,75
Limosa, franco-limosa	< 1,30	1,60	> 1,75
Franco-limosa, franco arcillo - Limosa	< 1,40	1,55	> 1,65
Arcillo-arenosa, arcillo-limosa, franco arcillosas (35- 45% de arcilla)	< 1,10	1,39	> 1,58
Arcillosa (>45% de arcilla)	< 1,10	1,39	1,39 > 1,47

Fuente: USDA 1999

Por otra parte, está la densidad real del suelo, no menos importante que la densidad aparente, la misma se determina obteniendo el peso seco de la muestra de suelo y el volumen de los sólidos de la muestra. Este último se realiza con un equipo denominado picnómetro, y el procedimiento significa la aplicación del principio de

Arquímedes. Es decir, determina que volumen de agua desplazan los sólidos al ser sumergidos (Rucks *et al.* 2004). Sin embargo, la FAO (2017), sostiene que la densidad real de los suelos que no poseen cantidades anormales de minerales pesados, está alrededor de $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$ si los contenidos de materia orgánica no superan a 1%.

2.1.4 Resistencia mecánica a la penetración del suelo

Uno de los parámetros físicos que afecta directamente el desarrollo y la productividad del maíz es la RMPS, debiéndose principalmente a la restricción que el suelo ofrece para ser penetrado libremente por el sistema radicular, además es importante destacar que este parámetro físico guarda relación con la velocidad de emergencia de la semillas, en este sentido, Mello Prado *et al.* (2001), quienes mediante estudios relacionados a la velocidad de emergencia de la semilla de maíz y la RMPS, demostraron que las semillas tardan más en emerger en un suelo con mayor valor de RMPS, y que la misma afecta posteriormente al cultivo en su desarrollo y productividad.

La resistencia de un suelo a la penetración de un instrumento de sondeo, es un índice integrado de la compactación de suelo, contenido de humedad, textura y tipo de arcilla y el instrumento usado para determinarla se denomina penetrógrafo y mide la fuerza necesaria para penetrar el suelo con una sonda (Rucks *et al.* 2004).

Por su parte Souza *et al.* (2001), sostienen que la RMPS es físicamente establecida por la presión, esta presión está dada por la relación entre la fuerza necesaria para ser penetrado el suelo y el cono ubicado en el extremo de la barra metálica del penetrometro, cuya área basal es conocida y constante.

Para la evaluación de la compactación del suelo, la RMPS es una de las propiedades físicas que más se utiliza como parámetro, sin embargo debe estar acompañado por las variables de humedad y densidad del suelo para una interpretación más precisa del grado de compactación del suelo (Freddi *et al.* 2006).

En relación a lo anterior, Imhoff *et al.* (2001), en un trabajo de investigación sobre el control de la calidad física del suelo con pastoreo, indicó que la RMPS, es un parámetro físico utilizado para establecer el grado de compactación del suelo, con

todo, para un mismo tipo de suelo, varía con la humedad y densidad del suelo y demostraron correlación negativa entre la RMPS y la humedad, correlación positiva entre RMPS y la densidad del suelo.

Actualmente se cuenta con varios equipos, dispositivos y técnicas para medir la RMPS, sin embargo, es importante que a la hora de evaluar la RMPS, además de la elección de un equipo adecuado, tener las condiciones estandarizado de humedad, atendiendo que el contenido de agua en el suelo influye en los valores de RMPS (Moraes *et al.* 2014)

La compactación del suelo, debido al colapso o disminución de los espacios de poros, es la causa más común de restricción física para el crecimiento y desarrollo de las raíces. Una vez que los poros han sido compactados hasta 0,2 - 0,3 mm de diámetro, es difícil que las raíces de los cultivos puedan penetrar libremente en el suelo (Brammer 2000).

Existen varios factores que pueden generar la compactación del suelo, en ese sentido Keller (2004), afirma que el tráfico de la maquinaria agrícola es la principal causa de compactación del suelo, la cual tiene carácter acumulativo. Así mismo, Hamza y Anderson (2005), mencionan que la influencia de las máquinas agrícolas en la compactación se expresa a través de la acción de: presión sobre el suelo, peso sobre los sistemas de rodaje, número de pasadas, velocidad de desplazamiento y patinaje; los cuales actúan sobre las condiciones prevalecientes en el terreno.

Los principales efectos de las propiedades del suelo están asociados con aquellos factores que mejoran la capacidad para el aire y la permeabilidad de los suelos. Estas son: textura, estructura, cantidad de agua y contenido de materia orgánica (Rucks *et al.* 2004).

Existen métodos biológicos para el manejo de suelos compactados y según Brammer (2000), son más económicos que los métodos mecánicos y consisten en utilizar las raíces de la vegetación natural o de cultivos de cobertura plantados para actuar como subsoladores biológicos que penetren en los horizontes densos, por ejemplo se podría utilizar el rábano forrajero (*Raphanus sativus*) y los arbustos

fijadores de nitrógeno *Tephrosia vogelii*, *Sesbania sesban* y *Gliricidia sepium* han sido también identificados como potencialmente útiles para la descompactación

García *et al.* (2010), realizaron un ensayo en suelo compactado, donde instalaron dos tratamientos: suelo compactado sin cultivo y con cultivo de caña de azúcar, con el objetivo de determinar el efecto de la caña de azúcar en las propiedades físicas de suelos compactados. En el mismo observaron que en parcelas experimentales, el tratamiento compactado no cultivado (CNC) se redujo la densidad aparente en 5,7%, la resistencia en 31,4% y aumentó la porosidad total en 2,3%. El tratamiento compactado-cultivado (CC) disminuyó la densidad aparente en 7,9%, la resistencia en 47,6% y aumentó la porosidad total en 3,5.

Esto demuestra que el cultivo de caña de azúcar, es una buena opción para el manejo de suelos compactados. Es también importante mencionar que el mal manejo del tránsito de maquinarias agrícolas durante del ciclo del cultivo, genera mayor variabilidad espacial de la RMPS, la cual presenta relación con la variabilidad espacial del rendimiento del maíz.

En base al estudio realizado por Valente *et al* (2015), quienes evaluaron la variabilidad espacial de la RMPS y del rendimiento de maíz en sistemas de siembra directa, en la cual demostraron que ambas variables presentaron una relación directa en cuanto a la variabilidad espacial, por lo que se recomiendan realizar un manejo diferenciado de las áreas compactadas, con el fin de mejorar las condiciones físicas del suelo y también el rendimiento del maíz.

2.1.5 Velocidad de infiltración de agua en el suelo

Las condiciones físicas-hídricas del suelo tienen un papel fundamental en el desarrollo adecuado y eficiente del maíz, teniendo en cuenta que son condiciones del suelo que permite el buen desarrollo del sistema radicular, mejora la infiltración y el almacenamiento del agua en el suelo (Matiassio *et al* 2014).

La infiltración se refiere al proceso a través del cual el riego o agua de lluvia, ingresa al suelo a través de la superficie, hacia sus capas inferiores, en forma vertical y horizontal. Este parámetro físico es importante conocer porque permite, a través de

un modelo matemático, llegar a predecir el tiempo que se necesita para reponer una cantidad de agua en el suelo para satisfacer las necesidades de la planta (CNR 2017).

Delgadillo y Pérez (2016), afirman que son varios los factores que afectan la velocidad de infiltración del agua en el suelo, como por ejemplo la compactación, la textura, sellamiento superficial, manejo de suelo, materia orgánica en el suelo, etc.

En este sentido la CNR (2017), establece que la textura es una de las propiedades físicas que más afecta la infiltración de agua en el suelo, esta será más rápida en suelos arenosos y más lenta en los arcillosos. Otro aspecto que es importante destacar y que tiene que ver directamente con la velocidad de infiltración, es el contenido de humedad del suelo al momento del riego o lluvia.

Así mismo, Delgadillo y Pérez (2016) establecen que la velocidad de infiltración depende fuertemente de la textura del suelo, así el tiempo para alcanzar esta velocidad y su valor dependerá de la textura (Figura 2).

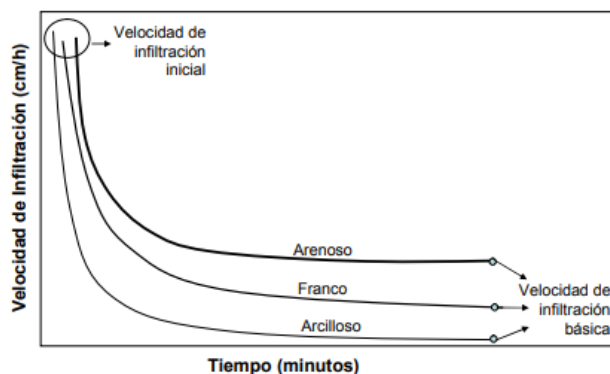


Figura 1. Variación de la curva de velocidad de infiltración por la textura del suelo.
Fuente: Delgadillo y Pérez (2016).

Para tener una referencia, en la Tabla 2 se muestran rangos de la velocidad de infiltración para los diferentes tipos de suelo

Tabla 2. Rangos de velocidad de infiltración en diferentes texturas del suelo (Brouwer *et al.* 1988).

Textura	mm.h⁻¹
Arenosa	Más de 30
Franco arenosa	20-30
Franco	10-20
Franco arcilloso	5-10
Arcillo	1-5

Existen varias metodologías para la determinación de la infiltración del agua en el suelo, entre las cuales se puede mencionar el método del infiltrómetro del anillo doble, simulación de lluvia. En este sentido, USDA (1999) describe una metodología para la medición de la velocidad de infiltración del agua en el suelo, basado en la utilización de anillos de 6 pulgadas de diámetro, por lo mismo, es denominado “método del anillo reducido”.

2.3 Variabilidad espacial

Las propiedades físicas del suelo presentan frecuentemente una alta dependencia espacial, por tal motivo se vuelve imprescindible el estudio de la variabilidad espacial para un manejo más preciso de las degradaciones físicas, reducir el impacto ambiental, la optimización del uso de maquinarias y también para aumentar la eficiencia de los equipos de trabajo (Dos Santos *et al.* 2012).

Por lo general las medidas correctivas aplicadas para las propiedades físicas del suelo, son por medio de prácticas de mecanización, sin considerar su dependencia espacial, este tipo de manejo son inadecuadas e ineficiente para solucionar los problemas físicos del suelo (Ramirez-López 2008).

Con el aumento de la mecanización y la exigencia de la producción a gran escala, las áreas cultivadas normalmente han sido tratadas de forma uniforme. Por lo tanto, las dosis de aplicación de correctivos o fertilizantes agrícolas son calculados en base a valores promedios y la aplicación es realizada uniformemente en toda el área (Sparovek y Schnug 2001).

Sin embargo, suelos de la misma clase taxonómica o de aparente homogeneidad, pueden presentar diferencias espaciales significativas en sus atributos (Bouma *et al.* 1999 y Souza *et al.* 2004). Por lo tanto el análisis de la variabilidad espacial de las propiedades físicas, principalmente de la compactación del suelo, por medio de la geoestadística puede indicar alternativas de manejo para reducir los efectos de la variabilidad de los suelos sobre el rendimiento de los cultivos y mejorar de esta manera la respuesta de los a los diferentes manejos agronómicos (William *et al.* 2007).

Buscando resolver el problema de la heterogeneidad del suelo, en la actualidad se ha ido adoptando nuevas tecnologías, tal es el caso de la agricultura de precisión, cuya finalidad es el gerenciamiento localizado de la labor realizada a través de la disponibilidad de herramientas que permiten la identificación de la variabilidad de los atributos del suelo y su intervención de forma localizada, permitiendo, así, la aplicación de insumos en los locales correctos y en las cantidades requeridas (Mzuku *et al.* 2005).

Molin (1998), cita la importancia del sistema de posicionamiento global (GPS), como responsable por la impulsión de la agricultura de precisión. El sistema de muestreo de suelo en malla regular es una técnica que viene siendo utilizada con éxito para la detección de la variabilidad de los atributos del suelo, que consiste en el georeferenciamiento de las muestras de suelo a través del uso del GPS.

La variabilidad espacial de los atributos físico-químicos del suelo es un hecho y puede ocurrir en varias escalas. Esta variabilidad, detectada por los muestreos de suelo, puede ser visualizada a través de mapas generados en programas específicos para el gerenciamiento de datos especializados, denominados SIG (Sistema de información geográfica). Los muestreos de suelo realizados para generar mapas de fertilidad, enclavado, productividad y otros, en su gran mayoría son realizados de acuerdo con una malla de muestreo definida previamente con base en las características del área y en la densidad de muestreo deseada (Molin 2000).

Otra nueva tecnología, es la geoestadística que surge como una de las técnicas más importantes, visto que ella podría propiciar la reducción de los costos y el

aumento de la productividad de los cultivos, principalmente cuando aplicada a cultivos económicamente expresivos (Johnson y Richard 2005).

Una de las maneras más utilizadas para representar la variabilidad espacial de los atributos del suelo de un área es por medio de mapas de iso-líneas (Burgess y Webster 1980). Dentro del concepto de agricultura de precisión, son definidos tres tipos de mapas de iso-líneas: mapas de condición, mapas de recomendación o prescripción y mapas de productividad. Los mapas de condición, muestran la distribución espacial de los parámetros evaluados en una determinada área, antes de cualquier corrección o intervención. Mapas de recomendación son derivados de uno o más mapas de condición y contienen informaciones sobre las cantidades necesarias de insumos o prácticas agrícolas que cada local específico del área deberá recibir (manejo localizado), respetando la variabilidad de los atributos evaluados (Mapas de condición), siendo la base para la tecnología de la aplicación de dosis variables. El mapa de desempeño permite evaluar como el área se presenta después del manejo localizado. De esta forma, la caracterización de la variabilidad de los recursos es de fundamental importancia para el uso efectivo de la tecnología de agricultura de precisión.

El estudio de la variabilidad espacial de los parámetros del suelo, es fundamental para establecer manejos más específicos a las condiciones presentes en cada área, por ejemplo, en base a los valores de la variabilidad espacial de la RMPS, se puede estimar la variabilidad de la compactación del suelo, lo cual permite establecer manejos de descompactación del suelo, con el fin de prevenir problemas futuros relacionados a la compactación del suelo (Velente *et al.* 2015).

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Localización de la experimentación

El área de estudio (AE), estuvo instalada en la propiedad de la Cooperativa Volendam, ubicada en la Colonia del mismo nombre, Distrito Villa del Rosario, al oeste del Departamento de San Pedro, localizado en la latitud Sur $24^{\circ}27'00''$ y longitud Oeste $24^{\circ}0,30'00''$, con una altura de 237 msnm (Datum WGS 84) (Figura 2).

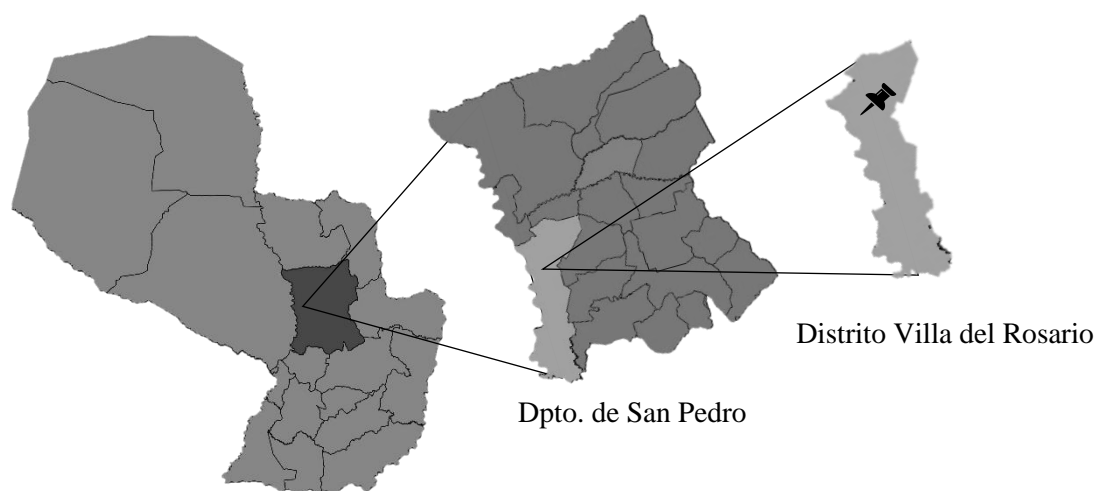


Figura 2. Ubicación del área de estudio (AE) en el mapa del Paraguay.

De acuerdo a la DGEEC (2012), el clima de la zona se caracteriza por ser predominantemente lluvioso y húmedo (Sub tropical), con una temperatura media de 24°C , siendo la máxima de 35°C y la mínima de 10°C . La precipitación media anual es aproximadamente 1.200 mm. Las lluvias se distribuyen en todas las estaciones, con un promedio mensual de precipitaciones de 129 mm, salvo en los meses de mayo a agosto, durante los cuales la media baja a 52,2 mm.

La precipitación registrada el año que fue realizada la investigación (2018), se registró un total de 1.393 mm., con un promedio mensual de 116 mm. Un año con un poca más de precipitación comparando con los datos promedios históricos de la zona ($1200\text{ mm anual}^{-1}$).

El mes con mayor precipitación durante la investigación fue enero (227 mm), y el mes con menos precipitación fue abril (7 mm) (Figura 3) (Anexo 1), considerando que el periodo de investigación fue de Enero 2018 a Junio 2018.

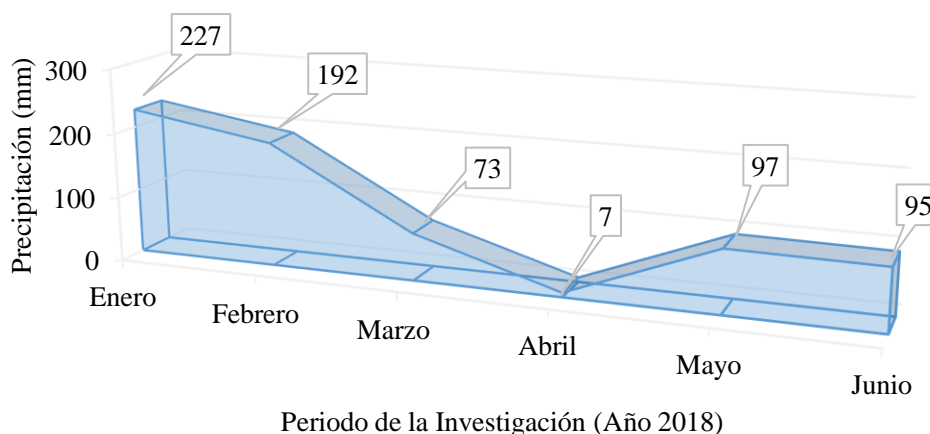


Figura 3. Datos de precipitación mensual registrada en el Distrito de Villa del Rosario, Dpto. San Pedro, durante el periodo de investigación (Enero 2018 a junio 2018), proveído por la Cooperativa Volendam. 2019.

En relación a datos edáficos de la zona; en la región predomina suelos clasificados como Arenic Paleudult, con textura arenosa de origen arenisca, que se caracteriza por tener un alto índice de infiltración, poca acumulación de materia orgánica y con nivel de fertilidad media (Lopez *et al.* 1995).

En relación al contenido de agua del suelo (%), específicamente durante la medición de la RMPS, (Enero 2018/ Abril 2018), de las diez parcelas evaluadas se presentan en la Figura 4 (Anexo 2), cuyos valores fueron obtenidos utilizando un sensor de humedad del suelo, en el momento de la evaluación de la RMPS. En promedio las parcelas presentan un contenido de agua de 10,84 %, donde la parcela con mayor contenido de agua en el suelo fue la parcela 5 (14, 8 %) y con el menor contenido de agua en el suelo fue la parcela 7 (5,2 %).

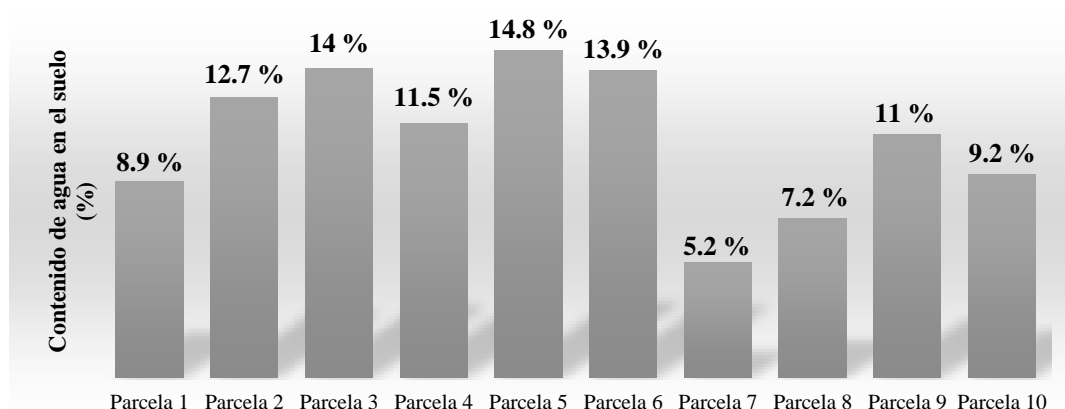


Figura 4. Datos promedios de contenido de agua en suelo (%) durante la evaluación de la Resistencia Mecánica a Penetración del suelo (RMPS), de las diez parcelas evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

3.2 Diseño para la recolección de datos

La investigación fue realizada en dos etapas, la primera etapa, que consistió en la determinación de la distribución espacial de la (RMSP), en diez parcelas (Anexo 3), destinadas a la producción comercial de granos (Figura 4). Para la segunda etapa del trabajo fue seleccionada la parcela número seis (6) de la primera etapa de la investigación, donde la misma, contaba con una superficie de 31 ha (Anexo 4), al igual que las demás parcelas viene siendo utilizado bajo un manejo conservacionista (Sistema de Siembra directa) en los últimos veinte años, caracterizado por un cultivo de verano (Soja) seguido de maíz (Zafriña) en el invierno, con el fin de mantener siempre cubierta y en producción el área.

Previo al inicio de la determinación de las variables de estudio fue realizada una vectorización del área experimental, a través de un receptor GNSS, de la marca Trimble®, modelo Juno 3B, con el cual se demarcaron los vértices de cada área de estudio. Posteriormente se elaboró la malla de muestreo, que consistió en 390 puntos, distribuidos en 349 ha, conformada por diez parcelas experimentales, de modo a proporcionar el mayor número de puntos posibles para una mejor caracterización de cada área. En la Tabla 3 se puede observar el número de puntos de muestreo por cada parcela, como así también la superficie de cada parcela. La determinación de la

localización y distribución geográfica de todos los puntos de muestreo a nivel de campo se realizó por medio del programa informático GPS TrackMaker PRO.



Figura 5. Imagen satelital del área de estudio (AE), ubicada en propiedades de la Coop. Volendam, Distrito Villa del Rosario, Dpto. de San Pedro, Paraguay, 2018. Fuente: Google Earth.

Tabla 3. Superficie (ha) y Puntos de muestreo de las diez parcelas evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

Parcela	Superficie (ha)	Puntos de muestreo (Unidad)	Grilla de muestro (ha)
1	18	30	0,6
2	83	78	1
3	61	40	1,5
4	58	40	1,5
5	18	39	0,5
6	31	37	0,8
7	20	34	0,6
8	20	32	0,6
9	20	30	0,6
10	20	30	0,6
TOTAL	349	390

Para la primera etapa de la investigación, se evaluó la RMPS hasta los 80 cm de profundidad (o hasta donde las condiciones del suelo permitían), y los valores obtenidos por cada centímetro de profundidad, fueron agrupados en 5 profundidades (0-10 cm, 10-20cm, 20-30cm, 30-40 cm y mayor a 40 cm), para el análisis e interpretación de la distribución espacial de la compactación del suelo.

Para la segunda etapa del trabajo, las variables evaluadas fueron: Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS), densidad aparente del suelo (DAP), contenido de agua del suelo (Hg), porosidad total (PP), las cuales fueron evaluadas en tres profundidades diferentes del perfil del suelo (0-10 cm, 10-20 cm y 20 a 30 cm de profundidad), tasa de infiltración del agua (I) y rendimiento de granos de maíz (RG).

3.3 Descripción de las variables evaluadas

3.3.1 Resistencia Mecánica la Penetración del Suelo

Para la medición de la RMSP, se utilizó un penetrómetro electrónico de accionamiento manual, de la marca Eijkelkamp, modelo Pentrologger 06.15.AS, equipo con un sistema de adquisición y procesamiento automático de datos de resistencia georeferenciados, en forma gráfica y numérica en tiempo real, el cual nos permitió determinar el Índice de Cono (IC) hasta los 80 cm de profundidad o hasta donde las condiciones del suelo permitía. Cada punto de muestreo por parcelas fueron localizados con la ayuda de receptor tipo GPS Trimble Juno 3B (Anexo 5).

Los resultados de RMSP fueron expresados en MPa por cada camada de 10 cm de profundidad. Cada punto muestreado fue georeferenciado de tal manera a poder generar un mapa de compactación en programas específicos para el gerenciamiento de datos especializados, denominados SIG (Sistema de Información Geográfica).

3.3.2 Densidad aparente del suelo

La determinación de la densidad aparente (DAP) se realizó por el método del cilindro, se tomó muestras de suelos a profundidades de 10, 20 y 30 cm (Anexo 6), de

los puntos de muestreos establecidos y georeferenciados previamente mediante la malla de muestreo del AE, los resultados fueron expresados en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Las muestras de suelo se tomaron en cilindros de aceros con un volumen definido (cm^{-3}), posteriormente esas muestras fueron colocadas en estufa por 48 horas a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, y luego se pesó la muestra seca expresada en gramos (g). Teniendo todos los datos se calculó el valor de la DAp utilizando la siguiente ecuación matemática (1):

$$DAp = \frac{\text{peso seco (g)}}{\text{volumen total (cm}^{-3}\text{)}} \quad (1)$$

3.3.3 Porosidad total

Para la determinación del porcentaje de porosidad total (PP), se aplicó la siguiente ecuación matemática (2):

$$PP = 1 - \left(\frac{DAp}{D_{\text{real}}}\right) \times 100 \quad (2)$$

Donde DAp corresponde a los valores de densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), y Dreal (Densidad real), corresponde a un valor constante de $2,65\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. Los valores obtenidos se multiplicaron por 100 y de esta manera los resultados fueron expresados en porcentaje (%).

3.3.4 Contenido de agua en el suelo

El contenido de agua en el suelo (Hg), fue determinada por el método de la estufa (Método gravimétrico), utilizando las mismas muestras tomadas para la determinación de DAp de las tres profundidades (10, 20 y 30 cm), las muestras de suelo fueron pesadas en estado húmedo y luego colocadas en estufa durante 48 horas, a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ y posteriormente fueron pesadas nuevamente las muestras para obtener el valor del peso seco de las muestras.

Obtenido los datos de peso húmedo (PH) y peso seco (PS), se aplicó la siguiente ecuación matemática (3):

$$Hg = \frac{PH-PS}{PS} \times 100 \quad (3)$$

Donde Hg corresponde a los valores de contenido de agua en el suelo (%), y PH: peso húmedo en gramos (g); PS: peso seco gramos (g).

3.3.5 Velocidad de infiltración del agua en el suelo

La determinación de la velocidad de infiltración del agua en el perfil del suelo (I), se realizó en base a la metodología propuesta por USDA (1999), que consiste en la utilización de un anillo de 6 pulgadas de diámetro (15 cm), que fue insertada a una profundidad de 2,5 cm en el suelo, se cubrió con una lámina de plástico, el anillo y la superficie del suelo dentro del anillo, este procedimiento evitó disturbar la superficie del suelo al agregar agua, luego se agregó un contenido de 444 mL de agua (2,5 cm de columna de agua) (Anexo 7).

Posteriormente se retiró la envoltura plástica y se midió con un cronómetro el tiempo que tardó en infiltrar toda el agua (444 mL). Se registró el tiempo en minutos y posteriormente se calculó la tasa de infiltración aplicando la siguiente ecuación (4):

$$\text{Velocidad de Infiltración} = \left(\frac{H}{t}\right)/60 \quad (4)$$

Donde H altura de la lámina de agua (mm); t es el tiempo en que tarda en infiltrar el agua (min) y 60 es para expresar los resultados en horas.

3.3.6 Rendimiento de granos

Una vez que el cultivo de maíz estuvo en condiciones de cosecha (Al término del ciclo agronómico), se procedió a realizar la cosecha de forma manual, de los mismos puntos de muestreos establecidos anteriormente. En cada punto de muestreo se demarcó un área de 2 m² y posteriormente se realizó la cosechó de la mazorca de maíz. Cada muestra colectada en el campo fue debidamente identificada e impermeabilizada en bolsa de papel, a fin de mantener inalteradas las mismas. Posteriormente se procedió al desgranamiento de la mazorca en forma manual y luego fue determinado el peso de los granos de maíz a través de una balanza electrónica para la determinación de la masa y la humedad de los granos, por último cada muestra obtenida en cada uno de los puntos de cosecha fueron expresados en kg.ha⁻¹ (Anexo 8).

3.4 Método de control de calidad de los datos

Las mediciones a campo para la determinación de las diferentes variables analizadas se realizaron en condiciones climáticas similares para reducir errores por variaciones de temperatura y humedad.

3.5 Métodos de análisis e interpretación

Los datos obtenidos, primeramente, fueron sometidos a un análisis exploratorio (Estadística descriptiva), con la finalidad de describir los parámetros estadísticos, específicamente para analizar las medida de posición de los datos (Media, Mediana, Mínimo y Máximo) y forma de distribución de las mismas (coeficiente de variación (CV), Asimetría y Kurtosis), que auxilien en la identificación de la tendencia, dispersión y forma de distribución de los datos (Homogeneidad y normalidad). En este análisis se asumió que las observaciones son independientes espacialmente, las variaciones de un lugar a otro fueron consideradas aleatorias, no teniendo en cuenta sus posiciones. Con este análisis se buscó verificar, principalmente, la existencia de alguna discrepancia entre los valores mínimo y máximo, y si los datos presentan una distribución normal (Valores de los coeficientes de asimetría y curtosis próximos a cero) o no. Considerando que cuando un conjunto de datos, se aproximan a la distribución normal, los valores de asimetría y curtosis a su vez se aproximan a cero (Vieira 2000).

El conjunto de datos que no presentaba una distribución normal y/o homogénea, se buscó ajustar los valores mediante técnicas estadísticas en la medida posible, buscado obtener una distribución normal y homogénea de los datos.

Los coeficientes de Asimetría y Kurtosis, fue analizado en base a los criterios de Dicowskiy (2008) y la variabilidad de los datos fue analizada y clasificada en función del coeficiente de variación (CV), de acuerdo con el criterio propuesto por Warrick y Nielsen (1980), que consideran: variabilidad baja ($CV < 12\%$); media ($12\% < CV < 60\%$) y alta ($CV > 60\%$). De acuerdo con los mismos autores, algunos atributos del suelo pueden presentar coeficiente de variación entre 10 y 100%. Según Landim (1998), el coeficiente de variación nos da una medida relativa de la precisión

del experimento, siendo útil en la evaluación de dispersión de datos. Para el análisis estadístico fue utilizado el programa estadístico InfoStat.

También se realizó un análisis de correlación entre los valores de la resistencia mecánica a la penetración, densidad aparente, porosidad, contenido de agua, la velocidad de infiltración del agua en el suelo y el rendimiento de granos de maíz.

Para el análisis de los resultados de coeficiencia de correlación se consideró que una perfecta correlación entre dos variables debe poseer un coeficiente de correlación (r) igual a 1,0 (Correlación directa) o -1,0 (Correlación inversa), en base a lo establecido por Kitamura (2004) los resultados fueron clasificados como: a) extra alto si $0,80 \geq r \leq 1,0$ o $-0,80 \geq r \leq -1,0$; b) alto si $0,60 > r < 0,80$ o $-0,60 > r < -0,80$; c) moderado si $0,40 > r \leq 0,60$ o $-0,40 > r \leq -0,60$; d) bajo si $0,20 > r \leq 0,40$ o $-0,20 > r \leq -0,40$ y e) nulo si $0,00 > r \leq 0,20$ o $-0,00 > r \leq -0,20$.

El mismo autor, además considera que una excelente correlación lineal entre dos variables debe poseer un coeficiente de correlación con valores mínimo, superior a + 0,60 (Correlación positiva) y -0,60 (Correlación negativa).

Realizado ajustes necesarios a los datos para la distribución normal, se realizó el análisis geoestadístico de los datos, a través del programa GS+Geostatistics (Gamma Design Software), utilizando los valores de las variables en estudio, llevando en consideración los vecinos más próximos, con sus respectivas coordenadas de campo para la construcción de los semivariogramas y los modelos teóricos que mejor caracterizan el fenómeno en el área de estudio.

La dependencia espacial fue analizada por medio de los ajustes de semivariogramas y clasificados de acuerdo con lo propuesto por Cambardella *et al.* (1994), quienes establecen que cuando el valor porcentual en relación al valor máximo de la semivarianza es menor que el 25%, esta dependencia puede ser considerada alta, cuando esta relación asume grandezas entre 25 a 75%, media, y cuando la misma presenta mayor que 75%, baja.

Y finalmente fueron construidos los mapas temáticos según Vieira (2000), de aquellas variables que presentan variabilidad especial, a través de la interpolación por

krigagen y aquellos que no presentaban variabilidad espacial (Efecto pepita puro), por el método de interpolación inversa a la distancia.

La interpretación y clasificado de los valores de RMSD, fue realizado en base a lo establecido por Klein *et al.* (1998) y USDA (2017), quienes afirman que a partir de los 2 MPa (Nivel alto) comienzan a restringir el crecimiento del sistema radicular de las plantas, por lo tanto en esta investigación se presentan cinco niveles de clasificación: bajo (Inferior a 1,5 MPa), moderado (1,5 a 2 MPa), muy alta (2,5 a 3,5 MPa) y Extremadamente alta (Más de 3,5 MPa).

Los valores obtenidos para la DAp fue interpretado en base a los parámetros establecidos por USDA (1999), para suelos con textura arenosa, quién establece como DAp ideal 1,5 g.cm⁻³, por la mismo, la escala de interpretación fue clasificada en los siguientes niveles: muy alta (>2,01 g.cm⁻³), Alta (1,50 a 2,00 g.cm⁻³), ideal (1,21 a 1,50 g.cm⁻³), bajo (1,00 a 1,21 g.cm⁻³) y muy bajo (Menor a 1,00 g.cm⁻³).

El análisis e interpretación de la porosidad del suelo se realizó en base a lo establecido por USDA (1999), para suelo con textura arenosa, de 45% como ideal, en el caso de la velocidad de infiltración del agua en el suelo se estableció como un valor ideal de 20 a 30 cm.h⁻¹, para suelo con textura arenosa (Brouwer *et al.* 1988).

. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Primera Etapa

4.1.1. Estadística descriptiva de la resistencia mecánica a la penetración del suelo

En la primera etapa del estudio se pudo constatar que las primeras tres parcelas evaluadas (Parcela 1, 2 y 3), presenta el mismo comportamiento en cuanto a la Resistencia mecánica a la penetración del suelo, en las diferentes profundidades evaluadas (Tabla 4), es decir, a partir de los 10 cm de profundidad, en promedio se observó niveles de RMPS superiores a 2 MPa, que pueden ser clasificadas como alta (2 a 2,5 MPa), posteriormente a los 30 cm de profundidad, los niveles de RMPS fueron descendiendo.

Tabla 4. Parámetros estadísticos de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) de las parcelas 1, 2 y 3 a diferentes niveles de profundidad. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

Profundidad	Media	Mínimo	Máximo	Mediana	CV*(%)	Curtosis	Asimetría
Parcela 1 (RMPS) (MPa)							
0-10 cm	1,70	0,20	3,79	1,65	57,60	-0,96	0,12
10-20 cm	2,28	0,20	4,85	2,40	45,29	0,16	-0,27
20-30 cm	2,18	0,22	5,17	1,97	49,56	0,35	0,83
30-40 cm	2,19	0,98	5,31	2,09	41,46	2,04	1,39
>40 cm	1,90	1,18	2,95	1,64	23,19	-0,68	0,51
Parcela 2 (RMPS) (MPa)							
0-10 cm	1,97	0,30	4,60	1,90	33,84	2,16	0,66
10-20 cm	2,67	1,00	4,90	2,60	31,80	-0,51	0,29
20-30 cm	2,17	1,00	5,60	1,89	45,64	2,35	1,59
30-40 cm	1,76	0,70	5,60	1,50	49,79	5,62	2,30
>40 cm	1,78	0,80	4,60	1,60	40,46	4,33	2,10
Parcela 3 (RMPS) (MPa)							
0-10 cm	1,99	0,62	3,32	1,82	30,27	0,11	0,42
10-20 cm	3,07	1,50	4,86	3,23	26,05	-0,49	-0,08
20-30 cm	2,06	0,98	5,55	1,83	47,08	4,44	2,09
30-40 cm	1,58	0,78	5,10	1,44	45,14	2,95	3,23
>40 cm	1,64	0,65	3,21	1,59	26,84	2,88	1,06

Los niveles más altos de RMPS registrado en estas primeras parcelas (Parcelas 1, 2 y 3) evaluadas, fueron del orden de 5,3; 5,6 y 5,5 MPa respectivamente, las cuales fueron observadas a los 30-40 cm, 20-40 cm y 20-30 cm de profundidad correspondientemente. Estos valores registrados de resistencia en estas profundidades fueron extremadamente altas (Más de 3,5 MPa) y puntuales (Tabla 4).

Analizando los resultados estadísticos de la parcela 4 y 5 (Tabla 5), se verifica que en promedio tienden a tener el mismo comportamiento, en este caso solamente en la camada de 10-20 cm de profundidad se observa niveles de compactación (RMPS \geq 2 MPa), y posteriormente fue descendiendo los valores de RMPS en ambas parcelas, registrándose niveles máximos de 4,6 y 4,9 MPa respectivamente, cuyos valores son clasificados como extremadamente altas (Más de 3,5 MPa) (Tabla 5).

Tabla 5. Parámetros estadísticos de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) de las parcelas 4 y 5 a diferentes niveles de profundidad. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

Profundidad	Media	Mínimo	Máximo	Mediana	CV*	Curtosis	Asimetría
Parcela 4 (RMPS) (MPa)							
0-10 cm	1,41	0,60	2,80	1,25	36,92	0,05	0,83
10-20 cm	2,37	0,90	4,20	2,25	35,21	0,88	0,21
20-30 cm	1,95	1,10	4,60	1,80	40,62	3,56	2,05
30-40 cm	1,66	1,00	3,50	1,60	30,65	3,88	1,76
>40 cm	1,87	1,00	4,00	1,75	34,10	3,09	1,80
Parcela 5 (RMPS) (MPa)							
0-10 cm	1,78	0,90	3,30	1,80	30,35	0,75	0,82
10-20 cm	2,35	1,20	4,90	2,20	32,71	1,58	1,12
20-30 cm	1,72	0,90	4,10	1,50	36,30	5,89	2,35
30-40 cm	1,56	0,70	3,40	1,50	34,99	1,69	1,17
>40 cm	1,96	1,10	2,70	1,95	17,72	0,02	-0,13

*CV: Coeficiencia de Variación

En la parcela 6 (Tabla 6), no se observó niveles de compactación (RMPS \geq 2 MP), sin embargo, lo valores de RMPS fue aumentado hasta la profundidad de 10-20 cm, donde se registró en promedio un valor de 1,86 MPa (Nivel moderado) y posteriormente los valores fueron descendiendo en función a la profundidad del suelo, registrando valores bajos de RMPS (RMPS < 1,5 MPa), a los 40cm de profundidad.

En cambio, en la parcela 7 (Tabla 6), si se registraron valores de RMSP altas (2 a 2,5 MPa) desde el inicio de la medición de la compactación en todas las profundidades analizadas y en la profundidad de 10 a 20 cm, se registró niveles

promedio de compactación del orden de 3,41 MPa, clasificada como un valor de RMSP extremadamente alta (Más de 3,5 MPa) de acuerdo con a los niveles propuesta en la metodología del trabajo. Prácticamente esta parcela (7) fue la que presentó los mayores problemas de RMSP en comparación a las demás parcelas estudiadas en el trabajo de investigación.

Tabla 6. Parámetros estadísticos de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) de las parcelas 6 y 7 a diferentes niveles de profundidad. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

Profundidad	Media	Mínimo	Máximo	Mediana	CV*	Curtosis	Asimetría
Parcela 6 (RMPS) (MPa)							
0-10 cm	1,41	0,50	2,50	1,30	38,98	-0,66	0,46
10-20 cm	1,86	0,30	4,30	1,75	33,16	2,24	1,03
20-30 cm	1,52	0,10	2,30	1,50	27,30	2,09	-0,60
30-40 cm	1,44	0,90	2,20	1,40	21,97	-0,45	0,42
>40 cm	1,80	0,80	2,40	1,80	17,80	1,59	-0,96
Parcela 7 (RMPS) (MPa)							
0-10 cm	2,35	0,30	4,00	2,50	38,98	-0,14	-0,54
10-20 cm	3,41	1,00	5,00	4,00	33,16	-0,61	-0,50
20-30 cm	2,78	1,00	5,00	3,00	36,23	-0,62	0,07
30-40 cm	2,00	1,00	4,00	2,00	31,62	2,17	0,85
>40 cm	2,45	1,00	5,00	2,00	31,31	2,24	0,88

*CV: Coeficiencia de Variación

Estos resultados puede deberse principalmente al contenido de agua en el suelo en la época en la que fue evaluada la parcela 7 (en promedio 5,2 % de contenido de agua) (Anexo 2), en comparación a las demás parcelas, a esto se puede sumar el tiempo prologando del manejo de compactación del suelo (subsulado) de esta parcela en relación a las demás parcelas.

Las parcelas 8 y 9 (Tabla 7), también presentaron similitud en el compartimento promedio de la RMPS en las profundidades evaluadas, en este sentido, se observó, que al igual de las anteriores parcelas analizadas, los niveles de compactación fueron altos (2 a 2,5 MPa) en la camada de 10 a 20 cm, valores del orden de 2,23 y 2,41 MPa respectivamente y posteriormente los valores de RMPS fueron disminuyendo en las camadas inferiores, sin embargo en las profundidades superior a 40 cm, en ambas parcelas, se observa nuevamente niveles de compactación superior a los 2 MPa (Nivel alto de RMPS).

En el caso de la parcela 10 (Tabla 7), se pudo observar un comportamiento promedio de la RMPS semejante a lo registrado en las profundidades de 10 a 30 cm en las parcelas 1, 2 y 3 (Tabla 4), donde los niveles de compactación fueron altos (2,20 a 2,52 MPa), posteriormente empezó a descender levemente los valores de RMPS (1,95 MPa) considerados niveles bajos de RMPS, para finalmente a partir de los 40 cm empezar nuevamente a registrar niveles compactados ($RMPS \geq 2$ MPa), es decir, niveles altos de RMPS.

Tabla 7. Parámetros estadísticos de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) de las parcelas 8, 9 y 10, a diferentes niveles de profundidad. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

Profundidad	Media	Mínimo	Máximo	Mediana	CV*(%)	Curtosis	Asimetría
Parcela 8 (RMPS) 9 y MPa)							
0-10 cm	1,68	0,40	3,70	1,55	59,04	-0,92	0,54
10-20 cm	2,23	0,40	4,20	2,35	52,52	-1,20	0,04
20-30 cm	1,64	0,20	3,20	1,55	50,35	-0,88	0,09
30-40 cm	1,59	0,20	3,80	1,50	49,86	1,21	0,08
>40 cm	2,10	1,30	3,30	2,10	17,73	2,23	0,54
Parcela 9 (RMPS) (MPa)							
0-10 cm	1,73	0,90	2,40	1,80	23,24	-0,66	-0,32
10-20 cm	2,41	1,50	4,00	2,30	25,12	-0,57	0,96
20-30 cm	1,96	1,00	4,30	1,80	38,82	3,26	1,98
30-40 cm	1,73	1,20	2,50	1,70	20,82	-0,79	0,43
>40 cm	2,11	1,50	3,00	2,05	17,66	0,28	0,75
Parcela 10 (RMPS) (MPa)							
0-10 cm	1,92	0,40	3,70	1,85	44,71	-0,87	0,12
10-20 cm	2,52	0,40	4,80	2,45	41,69	-0,45	0,04
20-30 cm	2,20	0,50	4,00	2,05	38,48	-0,29	0,16
30-40 cm	1,95	0,70	3,90	1,90	34,47	1,05	0,81
>40 cm	2,31	1,10	3,70	2,30	29,71	-0,52	0,02

*CV: Coeficiencia de Variación

De manera general las diez parcelas evaluadas presentan en promedio niveles más altos de RMPS en las profundidades de 10 a 20 cm. Estos resultados coinciden con las observaciones realizadas por Pinheiro (2005), quién evaluó el comportamiento espacial de la RMPS en tres parcelas de diferentes lugares, pero todas bajo un manejo conservacionista consolidado (más de 20 años), donde también pudo observar que los valores más altos en las tres parcelas, se concentran en las camadas de 10 a 20 cm de profundidad, también observó que los valores más bajos de RMPS se presentaba en las áreas con mayor contenido de materia orgánica.

Resultados semejantes, fueron observados también por otros autores (Mayor concentración de niveles altos de RMPS en las capas superficiales), en sistema de Siembra Directa, como Santos (1993), 0 a 5 cm; Klein (1998) de 0 a 40 cm; Bertol *et al.*(2001) de 0 a 0,25 cm y Silva Junior (2001) de 10 a 20 cm.

En base a los resultados obtenidos en esta investigación y también teniendo en cuenta los resultados de los autores citados, se puede establecer, en el sistema de siembra directa los niveles altos de RMPS, se presentan en las capas superficiales, debido principalmente a la poca o nula remoción de suelo y en el caso específico de esta investigación, al tránsito constante y excesivo de maquinarias agrícolas durante todo el ciclo de la producción agrícola.

Teniendo en cuenta lo expuesto y considerando los niveles altos de RMPS observado en las parcelas, es necesario aplicar manejos adecuados de la compactación del suelo, en este sentido, Hamza y Anderson (2005), sugieren establecer un plan de manejo para reducir y/o retardar el proceso de compactación de suelo, cuyo manejo incluya un tránsito controlado de maquinarias, rotación de cultivos que incluya plantas con raíces profundas, fuertes (Capaces de penetrar suelos relativamente compactados), y que aporten buena cobertura y materia orgánica para el suelo.

Con la estadística descriptiva de los datos obtenidos para la RMPS (Tabla 4, 5, 6 y 7), se demuestra que los valores de la media y de la mediana son similares para las diferentes profundidades evaluadas y por otro lado, los valores de asimetría y curtosis son bajos (Próximos a cero), indicando de esta manera que los datos tienen una distribución normal (Dicovski 2008).

El 84% de los datos presentan una asimetría positiva y solo el 16% una asimetría negativa, esto se traduce a que la mayoría de los datos analizados presentan una agrupación concentrada por debajo del valor promedio de la RMPS, correspondiente a las diez parcelas evaluadas (Dicovski 2008).

En relación a los valores de curtosis (Tabla 4, 5, 6 y 7) se demuestra que la mayoría de los datos (62%), presentan valores por encima a cero (Positivo) indicando una frecuencia leptocúrtica (Curva puntiaguda), lo que indica que la mayoría de los datos en las parcelas evaluadas los datos presentan una tendencia de mayor

homogeneidad y mayor concentración en torno a la media de los valores analizados y solo el 38% de los datos presentan valores de curtosis por debajo a cero (Negativo), esto indica que esos datos presentan una mayor variabilidad en torno a la media, es decir, una frecuencia mesocúrtica (Curva plana con respecto a la media) (Dicovski 2008).

En todas las parcelas evaluadas, en las diferentes profundidades, la RMPS presenta Coeficiencia de Variación (CV) media ($12\% < CV < 60\%$) (Tabla 4, 5 6 y 7), en base a los criterios establecidos por Warrick & Nielsen (1980), explicando de esta manera que los datos obtenidos para la RMPS no están muy dispersos en relación a la media obtenida. Valores elevados de CV pueden ser considerados como los primeros indicadores de existencia de heterogeneidad en los datos (Frogbrook. 2002).

4.1.2. Análisis geoestadístico de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS)

Los modelos de semivariogramas que fueron confeccionados en base a los datos de la RMPS de las diferentes profundidades de las diez parcelas evaluadas, se presentan en la Tabla 8 y 9, en la misma se puede analizar los parámetros de alcance (Ao), que expresa la distancia límite de dependencia espacial y la dependencia espacial $[C/(C_0+C)]$, que indica el cuanto de la variación total de los datos es explicada por la continuidad espacial.

El análisis geoestadístico (Tabla 8 y 9), demuestra que las diez parcelas evaluadas presentan en su mayoría (60%) valores de RMPS con dependencia espacial alta ($< 25\%$), solo el 8% presentan dependencia espacial media (25% a 75%) y el 16% una dependencia espacial baja (Efecto pepita) ($> 75\%$), de acuerdo a los parámetros establecidos por Cambarella *et al.* (1994).

Las altas dependencias espaciales se ve representadas en las parcelas 1 y 4, donde en todas las profundidades evaluadas presentan un nivel alto de dependencia espacial, por otro lado los niveles medio de dependencia espacial solamente se observa en la parcela 5 (profundidades de 20-30 cm y > 40 cm), parcela 6 (profundidad de 20-30 cm) y parcela 7 (profundidad de 30-40 cm).

Tabla 8. Parámetros de los modelos de semivariogramas para la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) de las diferentes profundidades de las diez parcelas evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

Profundidad	Modelo	Efecto pepita (Co)	Meseta C1 + Co	Alcance Ao (m)	Co/C1 + Co (%)	Dependencia Espacial
Parcela 1 (RMPS) (MPa)						
0-10 cm	Exponencial	0,111	0,986	120	11,260	Alta
10-20 cm	Exponencial	0,208	0,986	120	21,100	Alta
20-30 cm	Exponencial	0,208	0,980	120	20,610	Alta
30-40 cm	Exponencial	0,001	0,779	120	0,130	Alta
>40 cm	Exponencial	0,001	0,779	120	0,130	Alta
Parcela 2 (RMPS) (MPa)						
0-10 cm	Esférico	0,082	0,440	109	18,640	Alta
10-20 cm	Ef. Pepita	-----	-----	-----	-----	-----
20-30 cm	Esférico	0,141	0,975	161	14,460	Alta
30-40 cm	Esférico	0,001	0,743	203	0,130	Alta
>40 cm	Esférico	0,001	0,445	178	0,220	Alta
Parcela 3 (RMPS) (MPa)						
0-10 cm	Esférico	0,001	0,362	156	2,490	Alta
10-20 cm	Esférico	0,052	0,645	187	8,060	Alta
20-30 cm	Ef. Pepita	-----	-----	-----	-----	-----
30-40 cm	Ef. Pepita	-----	-----	-----	-----	-----
>40 cm	Esférico	0,001	0,215	166	0,050	Alta
Parcela 4 (RMPS) (MPa)						
0-10 cm	Exponencial	0,001	0,281	115	0,070	Alta
10-20 cm	Esférico	0,001	0,676	259	0,150	Alta
20-30 cm	Esférico	0,001	0,615	239	0,160	Alta
30-40 cm	Esférico	0,001	0,289	406	0,030	Alta
>40 cm	Esférico	0,083	0,434	368	19,120	Alta
Parcela 5 (RMPS) (MPa)						
0-10 cm	Exponencial	0,064	0,287	101	22,180	Alta
10-20 cm	Ef. Pepita	-----	-----	-----	-----	-----
20-30 cm	Exponencial	0,154	0,546	342	28,210	Media
30-40 cm	Ef. Pepita	-----	-----	-----	-----	-----
>40 cm	Exponencial	0,066	0,151	312	43,710	Media
Parcela 6 (RP) (MPa)						
0-10 cm	Ef. Pepita	-----	-----	-----	-----	-----
10-20 cm	Esférico	0,001	0,196	143	0,050	Alta
20-30 cm	Ef. Pepita	-----	-----	-----	-----	-----
30-40 cm	Exponencial	0,025	0,098	167	26,020	Media
>40 cm	Exponencial	0,028	0,128	210	21,880	Alta
Parcela 7 (RP) (MPa)						
0-10 cm	Exponencial	0,043	0,863	149	4,980	Alta
10-20 cm	Ef. Pepita	-----	-----	-----	-----	-----
20-30 cm	Exponencial	0,209	1,091	131	19,160	Alta
30-40 cm	Exponencial	0,216	0,780	933	27,690	Media
>40 cm	Exponencial	0,145	0,590	180	24,580	Alta

Tabla 9. Parámetros de los modelos de semivariogramas para la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) de las diferentes profundidades de las diez parcelas evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018 (Continuación).

Profundidad	Modelo	Efecto pepita (Co)	Meseta C1 + Co	Alcance Ao (m)	Co/C1 + Co (%)	Dependencia Espacial
Parcela 8 (RP) (MPa)						
0-10 cm	Ef. Pepita	-----				
10-20 cm	Ef. Pepita	-----				
20-30 cm	Ef. Pepita	-----				
30-40 cm	Exponencial	0,006	0,625	171	0,960	Alta
>40 cm	Exponencial	0,105	27240	1124	0,000	Alta
Parcela 9 (RP) (MPa)						
0-10 cm	Exponencial	0,007	0,169	131	3,960	Alta
10-20 cm	Exponencial	0,006	0,410	189	1,460	Alta
20-30 cm	Exponencial	0,028	0,514	147	5,450	Alta
30-40 cm	Ef. Pepita	-----				
>40 cm	Esférico	0,005	0,124	118	4,290	Alta
Parcela 10 (RP) (MPa)						
0-10 cm	Exponencial	0,176	0,765	189	23,010	Alta
10-20 cm	Ef. Pepita	-----				
20-30 cm	Ef. Pepita	-----				
30-40 cm	Ef. Pepita	-----				
>40 cm	Exponencial	0,028	0,488	153	5,740	Alta

Las parcelas cuyos valores de RMPS en las que la dependencia espacial fueron bajas, se adoptó la técnica de interpolación por el método de inversa a la distancia, atendiendo que presentaron una dependencia espacial baja entre los valores vecinos (Efecto pepita puro) (Vieria 2000).

La no presencia de dependencia espacial entre los datos, se puede justificar por el distanciamiento de muestreo utilizado para la metodología (100 x 100), esté distancia de muestreo no permitió observar la dependencia espacial en algunas de las parcelas evaluadas.

4.1.3. Mapas de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo.

La distribución espacial de los valores de RMPS, para cada una de las parcelas, en las diferentes profundidades evaluadas se puede visualizar en las Figuras 6 al 15,

representadas en mapas que fueron confeccionadas con sus correspondientes modelos de interpolación de acuerdo al nivel de dependencia espacial de los datos.

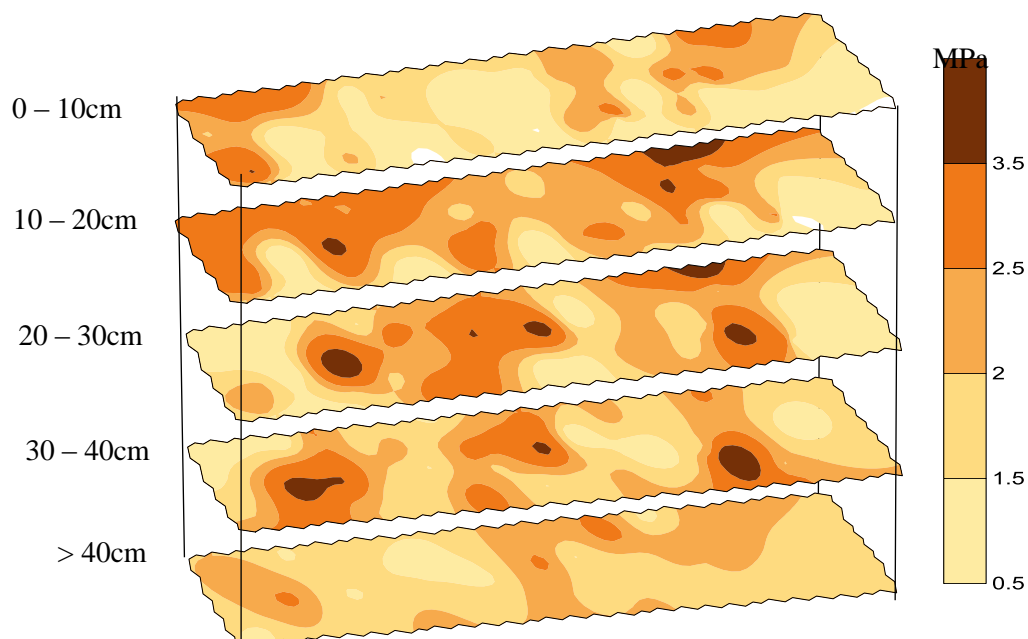


Figura 6: Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (MPa), de la Parcela 1 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

En la Parcela 1 se observa que en todas las profundidades evaluadas presentan una distribución aleatorizada de los valores de RMPS (Figura 6), en la primera camada (Hasta los 10 cm de profundidad), no se presentan niveles considerables de compactación (>2 MPa), a partir de los 10 cm hasta los 40 cm de profundidades ya se puede observar áreas dentro de la Parcela 1, presentando niveles de RMPS que pueden considerarse suelos compactados (> 2 MPa), cuyos valores se distribuyen dentro de la parcela de manera aleatoria.

A partir de los 40 cm los valores de RMPS empiezan a disminuir, cuyo mapa en esta profundidad presenta una distribución más homogénea de los valores de RMPS, indicando en este caso que las alteraciones físicas (Compactación), en esta profundidad no son significativas, pudiendo establecer que esta parcela la compactación se ve concentrada en los primeros 40 cm de profundidad. En un análisis

más detallado, se puede observar en el mapa, la camada donde se presenta más zonas compactadas dentro de la Parcela 1, es de 10 a 20 cm de profundidad.

En la parcela 2 (Figura 7) se presenta el mismo comportamiento, es decir, en la camada de 10 a 20 cm de profundidad, se presenta una mayor concentración de áreas compactadas, y los valores de RMPS va disminuyendo en relación a la profundidad, donde a los 40 cm las áreas compactadas disminuye considerablemente.

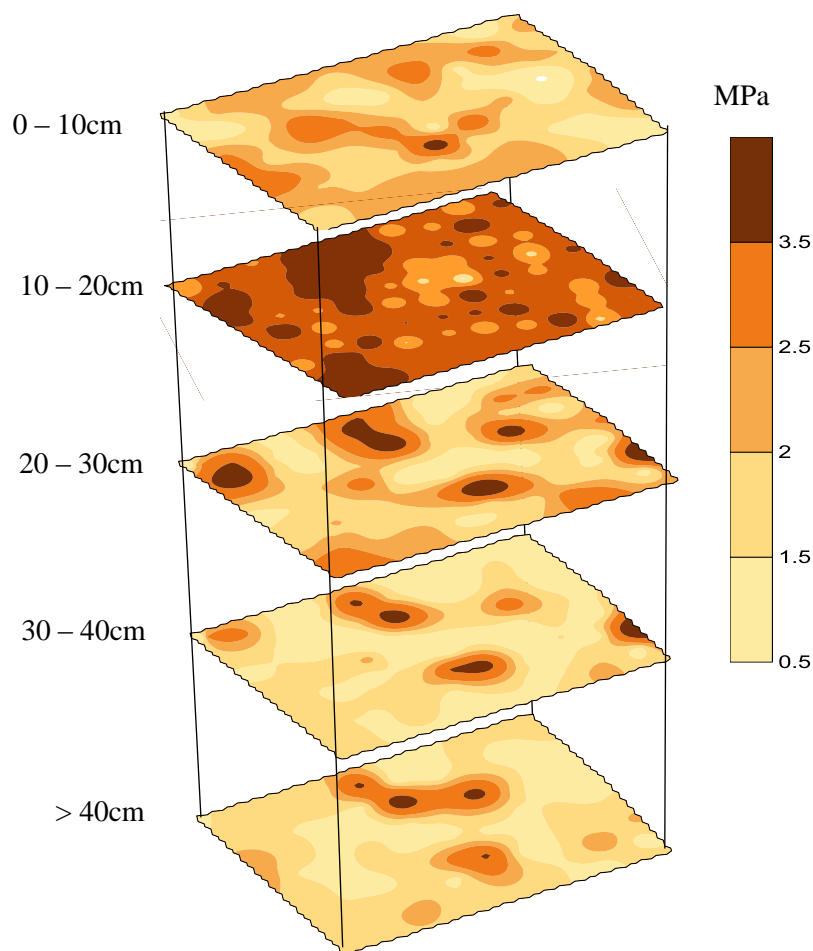


Figura 7: Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (MPa), de la Parcela 2 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

Estableciendo una comparación entre la parcela 1 y el 2, se puede observar que la parcela 2 presenta más áreas compactadas a los 10-20 cm de profundidad a diferencia de la parcela 1, además a esto se suma que el análisis geostadístico en la parcela 2 y en la profundidad mencionada los datos presentan una dependencia espacial baja (Efecto pepita).

A pesar de que estas parcelas geográficamente se encuentran una a lado de otra y los datos fueron tomadas con las mismas condiciones de humedad, las diferencias analizadas entre estas parcelas, puede deberse a que son parcelas que reciben el tránsito de diferentes maquinarias, con diferentes intensidades de presión, haciendo de esta manera visible esta diferencia en áreas compactación entre estas parcelas.

En este sentido, Ros *et al.* (2011), estudiaron justamente, el efecto de diferentes presiones de ruedas compactadoras de maquinarias agrícolas en suelo con manejo conservacionista (12, 18 y 24 kPa), observando diferencias en los valores de RMPS en relación a las diferentes presiones analizadas, en este caso, la presión de 18 kPa, fue la que proporción los valores más bajos de RMPS.

En la parcela 3 (Figura 8), los niveles compactados (RMPS > 2 MPa), se concentran en la camada de 20-30 cm de profundidad y posteriormente a mayor profundidad las áreas compactadas fue disminuyendo.

En este sentido, para la parcela 3 se puede establecer que la distribución de áreas compactadas fue aumentando hasta los 30 cm de profundidad y posteriormente fue disminuyendo, donde a partir de los 40 cm de profundidad ya no se observa áreas compactadas.

La parcela 3, a diferencias de las anteriores (parcelas 1 y 2), la compactación de suelo se concentra a mayor profundidad, es decir, a los 20-30 cm, estos resultados se podría atribuir a que las parcelas anteriores recibieron un manejo de compactación (subsulado), más recientemente.

Las alteraciones físicas (compactación), en suelo bajo manejo conservacionista, se presenta en principio en las camadas superficiales (Gomes *et al.* 2008), pero con el trascurso del tiempo, si esto no se maneja, los niveles de RMPS aumente y van acumulándose en el perfil del suelo, ocupando los perfiles más profundos del suelo.

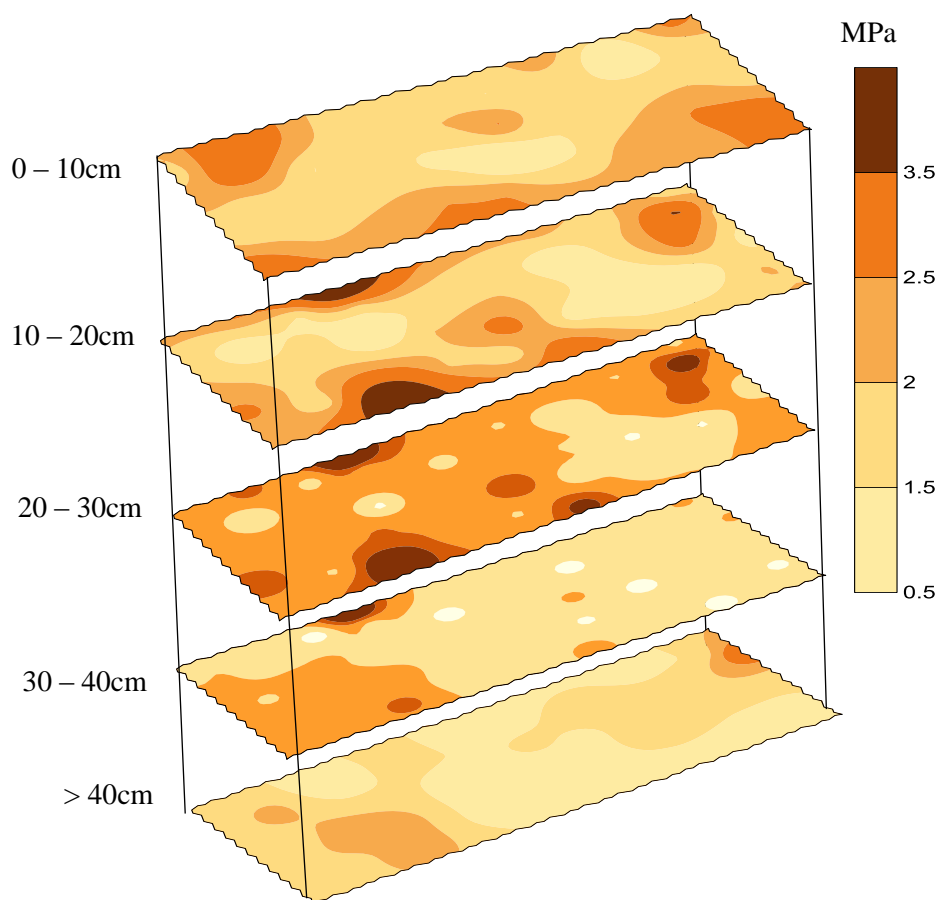


Figura 8: Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (MPa), de la Parcela 3 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

En la parcela 4 (Figura 9), nuevamente, al igual que la parcela 1 y 2, la camada que presenta mayor áreas compactadas ($RMPS > 2$ MPa), es la de 10-20 cm de profundidad, y posteriormente las áreas compactadas disminuyen en razón a la profundidad del suelo.

En esta parcela 4 (Figura 9), en la camada de 0-10 cm no se observan áreas compactadas, es decir, los niveles de RMPS en toda el AE se distribuye con un valor inferior a 2 MPa, cuyos valores pueden ser clasificados como medio y bajo.

En la parcela 4, la distribución de los niveles altos de la RMPS ($RMPS > 2$ MPa), a partir de los 10 cm de profundidad fue ocupando más áreas, hasta los 20 cm y posteriormente las áreas compactadas fueron disminuyendo hasta los 40 cm, donde las áreas compactadas desaparecen totalmente, es decir, a esta profundidad el suelo no presenta valores superiores a 2 MPa de RMPS.

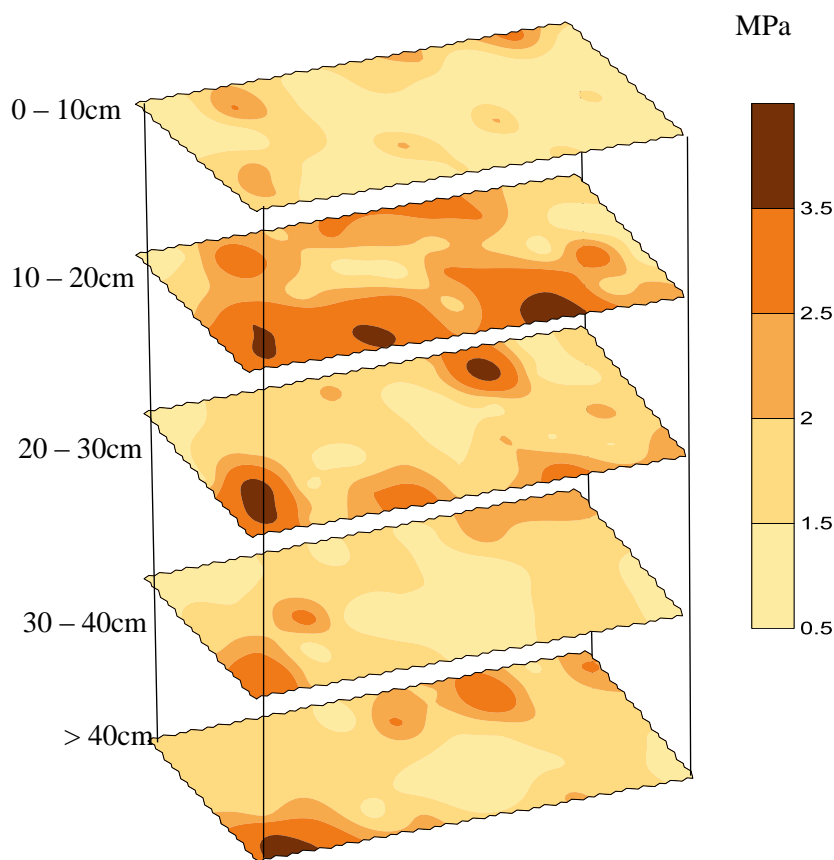


Figura 9: Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (MPa), de la Parcela 4 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

En la parcela 4, la distribución de los niveles altos de la RMPS ($RMPS > 2$ MPa), a partir de los 10 cm de profundidad fue ocupando más áreas, hasta los 20 cm y posteriormente las áreas compactadas fueron disminuyendo hasta los 40 cm, donde las áreas compactadas desaparecen totalmente, es decir, a esta profundidad el suelo no presenta valores superiores a 2 MPa de RMPS.

Sin embargo pasando los 40 cm de profundidad nuevamente se observan áreas con niveles de compactación, es decir, valores de RMPS superiores a 2 MPa.

La distribución espacial de la RMPS en la parcela 5 (Figura 10), se observan áreas compactadas ($RMPS > 2$ MPa), en la primera camada evaluada (0-10 cm de profundidad), sin embargo, en la camada de 10 a 20 cm de profundidad es donde la distribución de áreas compactadas es mayor en relación a las demás profundidades evaluadas.

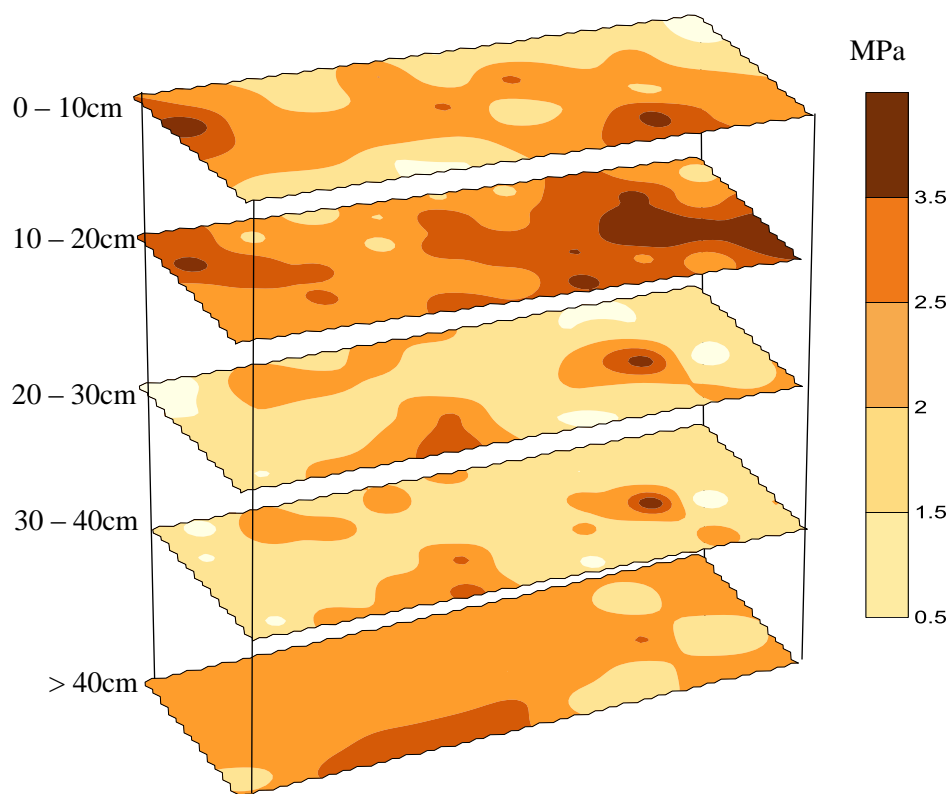


Figura 10. Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (MPa), de la Parcela 5 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

En la parcela 5, la distribución de RMPS en las capas de 20-30 cm y de 30-40 cm, presentan la misma distribución, donde se presentan áreas compactadas (RMPS > 2 MPa), pero pocas en relación a las áreas no compactadas (RMPS < 2MPa), dentro de esta camada.

A partir de los 40 cm de profundidad se observa (Figura 10), que la distribución de áreas compactadas (RMPS > 2 MPa), aumenta considerablemente, donde la mayor parte del área se encuentra compactada a esta profundidad.

En la parcela 5, por lo tanto, la distribución de áreas compactadas fue aumentando hasta los 20 cm de profundidad, posteriormente disminuyó totalmente hasta los 40 cm de profundidad, para luego a partir de los 40 cm volver a aumentar las áreas compactadas (RMPS > 2 MPa).

En la parcela 6 (Figura 11), la distribución espacial de las áreas compactadas se observa mayoritariamente en las capas de 10-20 cm y a partir de los 40 cm de

profundidad. En este sentido, esta parcela hasta los 10cm de profundidad no presentan áreas compactadas ($RMPS > 2$ MPa), es decir, en la camada de 0-10 cm los valores de RMPS inferiores a 2 MPa se distribuyen en toda en el área. A partir de los 10cm hasta los 20 cm se presenta áreas compactadas ($RMPS > 2$ MPa), sin embargo desde los 20 cm hasta los 30cm no se observan áreas compactadas ($RMPS > 2$ MPa) y a partir de las 30 cm de profundidad ya se observa nuevamente áreas compactadas, que va aumentando en relación a la profundidad. En base al mapa de distribución espacial en las diferentes profundidades de la parcela 6 (Figura 11), se puede establecer que la mayor área compactada se distribuye a partir de los 40 cm de profundidad en relación a las profundidades superficiales.

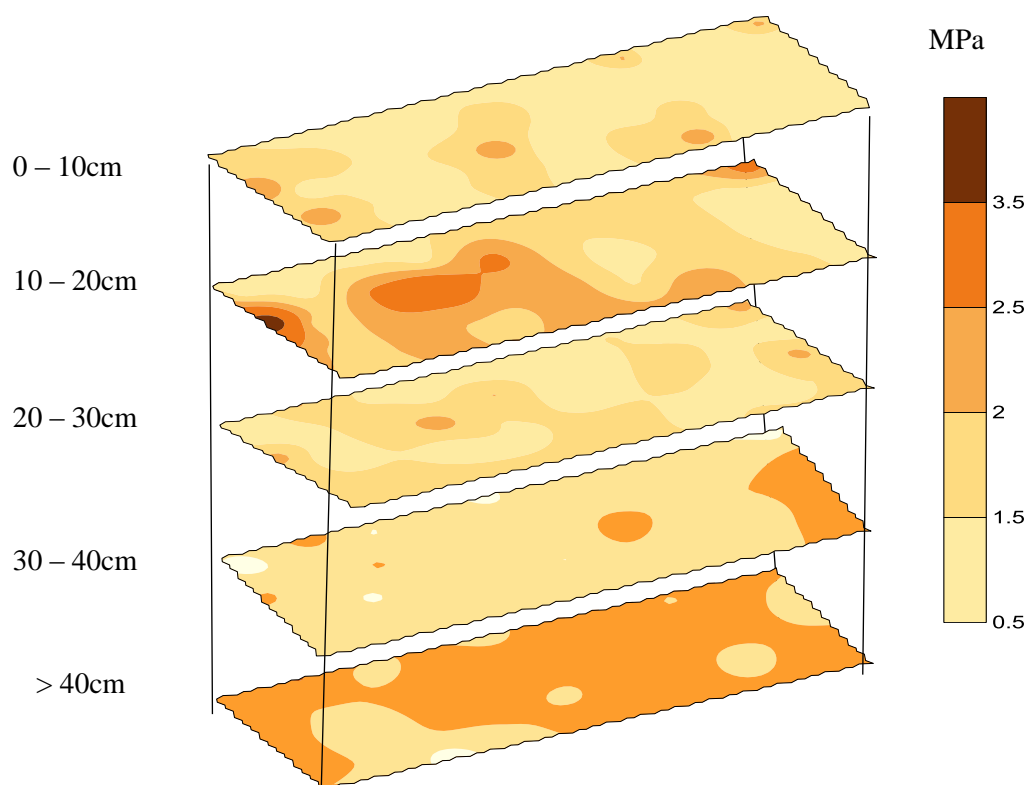


Figura 11. Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (MPa), de la Parcela 6 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

En el mapa de distribución espacial de la parcela 7 (Figura 12), se observa que hasta los primeros 30 cm de profundidad existes áreas compactadas ($RMPS > 2$ MPa), que se distribuye en la mayor parte del área, siendo en la profundidad de 10 a 20cm con mayor áreas compactada.

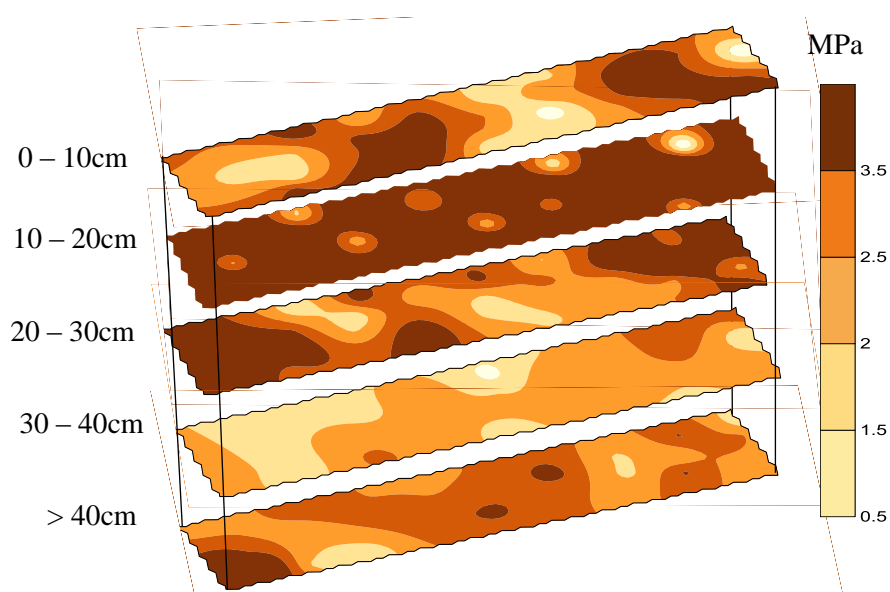


Figura 12. Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (MPa), de la Parcela 7 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

A partir de los 30 cm hasta los 40 cm de profundidad fue disminuyendo las áreas compactadas, en cuyas profundidades se observa que la mayor parte de la parcela no presenta niveles altos de RMPS ($RMPS > 2$ MPa). Por lo tanto, en la parcela 7 se puede establecer que se presenta áreas compactadas en todas las profundidades evaluadas, siendo la camada de 30- 40 cm con menores áreas compactadas dentro de la parcela. Sin embargo a partir de los 40 cm de profundidad, nuevamente se empieza a observar que las áreas compactadas van ocupando mayor superficie.

Dentro de la parcela 8 (Figura 13) se observa desde la primera camada evaluada (0-10 cm), áreas compactadas ($RMPS > 2$ MPa), que se distribuyen en pequeñas áreas por toda la parcela, estas áreas compactada van sumando superficie a medida que se aumenta en profundidad, de tal manera, que en la camada de 10 a 20 cm de profundidad se observa que la mayor parte de la parcela presenta niveles altos de RMPS ($RMPS > 2$ MPa).

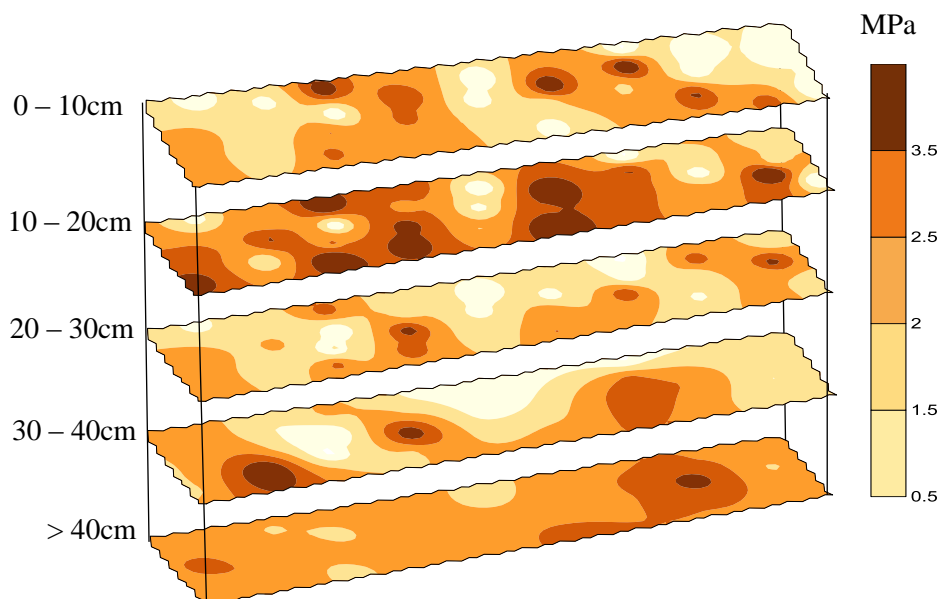


Figura 13. Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (MPa), de la Parcela 8 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

Las áreas compactadas fueron disminuyendo a partir de los 20 cm de profundidad hasta los 30 cm de profundidad, para luego, a partir de los 30 cm de profundidad se observa nuevamente aumento en la distribución de áreas compactadas en la parcela 8.

Por lo tanto, el mapa de distribución espacial de la RMPS de la parcela 8 (Figura 13) demuestra que esta parcela existen áreas compactadas ($RMPS > 2$ MPa) que se distribuyen de manera aleatoria en toda el área, siendo la profundidad de 20 cm a 30 cm, con menor áreas compactadas en relación a las demás profundidades evaluadas.

En el mapa de distribución espacial de los valores de RMPS en la parcela 9 (Figura 14), se observa áreas compactadas ($RP > 2$ MPa) mayoritariamente distribuidos dentro de la parcela hasta los 20 cm de profundidad, posteriormente las áreas compactadas ($RMPS > 2$ MPa) disminuye hasta los 40 cm de profundidad. A partir de los 40 cm de profundidad, nuevamente se observa que la parcela presenta mayoritariamente áreas compactadas ($RMPS > 2$ MPa), cuyos valores se distribuyen de una manera homogénea.

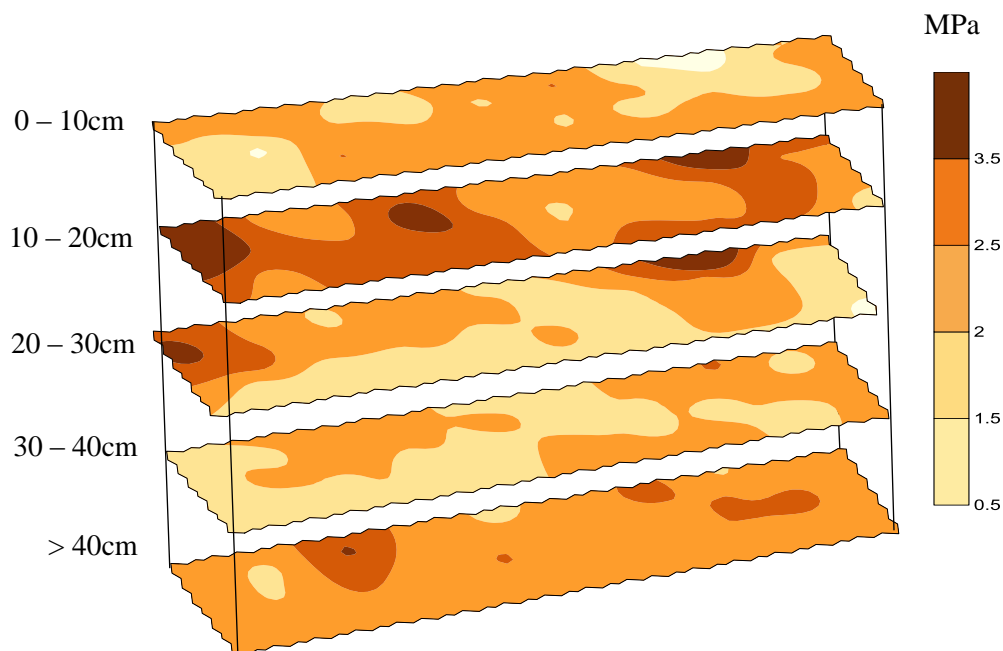


Figura 14. Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (MPa), de la Parcela 9 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

En base al comportamiento espacial de los valores de RMPS, se puede establecer que las áreas compactadas ($RMPS > 2$ MPa) empieza a observarse desde la primera camada evaluada (0-10 cm), que va en aumento hasta los 20 cm de profundidad, desde los 20 cm las áreas compactadas ($RMPS > 2$ MPa) disminuye hasta los 40 cm.

En relación a la parcela 10, la distribución espacial de los valores de RMPS (Figura 15), demuestra que en todas las profundidades evaluadas presentan mayoritariamente áreas compactadas ($RMPS > 2$ MPa), por lo tanto, esta parcela los valores RMPS se mantiene mayoritariamente con niveles altos ($RMPS > 2$ MPa) en las 5 camadas evaluadas.

En términos generales se puede establecer para este estudio de distribución espacial de los valores de RMPS para las 10 parcelas evaluadas, se presentan niveles altos de RMPS ($RMPS > 2$ MPa) principalmente en las camadas superficiales (de 0 a 20 cm de profundidad). Las áreas compactadas se van distribuyendo de manera heterogénea en las parcelas. La mayoría de las parcelas evaluadas presentan una

disminución de áreas compactadas desde los 20 cm de profundidad hasta los 40 cm y posteriormente las áreas compactadas van aumentando nuevamente.

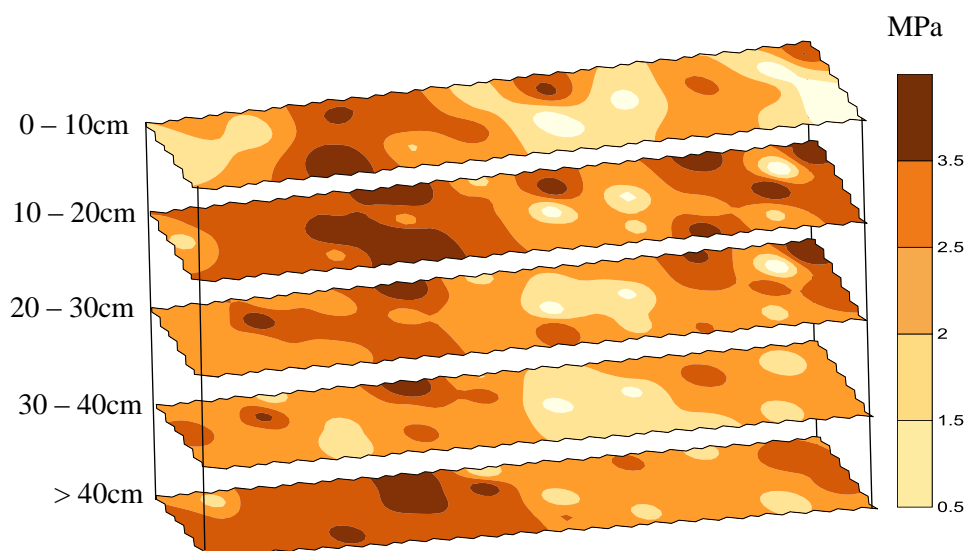


Figura 15. Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (MPa), de la Parcela 10 en las diferentes profundidades evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

En una investigación similar realizado en un suelo de textura arcillosa por Bonnin y Lanças (2014), estudiaron el comportamiento espacial de la RMPS en área bajo manejo conservacionista, en diferentes profundidades (las mismas profundidades estudiadas en esta investigación), constataron que se presenta camadas compactados desde los 10 cm hasta los 40 cm de profundidad, por lo tanto estos autores recomiendan para ese suelo, un manejo (subsulado) hasta los 40 o 50 cm de profundidad en toda la parcela, considerando que las áreas compactadas se distribuye en forma aleatoria, sin presentar áreas aisladas de manera significativa.

También es importante mencionar que el comportamiento de la compactación del suelo en las parcelas evaluadas podría deberse al sistema de manejo (Siembra directa) y sumándole a esto el tránsito contaste de maquinarias pesadas que se registran en las parcelas. En este sentido, Moarcir *et al.* (2013) quienes estudiaron el efecto del tránsito de maquinarias agrícolas en un suelo bajo manejo de siembra directa, afirman en base a sus estudios, que la resistencia a mecánica la penetración

del suelo aumenta con el número de tráficos principalmente después del primer paso de maquinarias, este aumento en la RMPS se refleja principalmente a profundidad a medida que aumenta el número de tráficos

4.2. Segunda Etapa

4.2.1 Estadística descriptiva de las variables físicas del suelo

La estadística descriptiva de las variables evaluadas (Tabla 10), demuestran que los valores similares de la media y de la mediana para cada uno de las propiedades físicas del suelo estudiadas a diferentes profundidades y los bajos valores de asimetría y curtosis (incluyendo los datos de la variable Rendimiento de Granos), indican que corresponden a una distribución normal, teniendo en cuenta que los valores de asimetría están próximos a cero. El 52% de los datos presentan una asimetría positiva y 48% una asimetría negativa, indicando de esta manera que la mayoría de los datos analizados presentan una agrupación concentrada por debajo del valor promedio de las variables estudiadas, de acuerdo a los criterios estadísticos establecidos por Dicoyskiy (2008).

Con respecto a los valores de curtosis se demuestra que el 48% de los valores analizados, tienen una curtosis por debajo a cero (negativo), teniendo una mayor variabilidad en torno a la media, es decir, una frecuencia mesocúrtica (curva plana con respecto a la media) y el 52 % de los datos tienen valores por encima a cero (positivo) indicando una frecuencia leptocúrtica (curva puntiaguda), es decir, los datos tienen una tendencia de mayor homogeneidad y mayor concentración en torno a la media (Dicoyskiy 2008).

Las variables de RMPS, Hg, t (% de arena, limo y arcilla) e I, en todas las profundidades evaluadas presentan una Coeficiencia de Variación (CV) media ($12% < CV < 60%$), la variables PP, DAp (en todas las profundidades evaluadas) y la RG, presentan CV bajo ($CV < 12%$), de acuerdo a los parámetros establecidos por Warrick & Nielsen (1980).

La mayor variación de los parámetros evaluados en el AE puede deberse a las actividades antrópicas, principalmente al tránsito no controlado de maquinarias agrícolas para el manejo agronómico del cultivo, desarrollado en el AE. Los valores

medios de la RMPS demuestran que en la camada de 0-10 cm el AE presenta 1,41 MPa de RMPS, estos valores fueron aumentando donde en la camada inferior (10-20 cm), se registró un valor promedio de 1,86 MPa, y posteriormente fue bajando nuevamente los valores de RMPS, donde a los 20-30 cm de profundidad se registró en promedio 1,52 MPa.

Tabla 10. Parámetros estadísticos de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS); Densidad aparente del suelo (DAp); Porosidad total del suelo (PP); Contenido de humedad (Hg); en tres profundidades diferentes, Velocidad de infiltración del agua (I) y Rendimiento de Granos (RG). Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

Profundidad	Media	Mínimo	Máximo	Mediana	CV*(%)	Curtosis	Asimetría
Resistencia a la Penetración (RP) (MPa)							
0-10 cm	1,41	0,50	2,50	1,30	37,42	-0,66	0,46
10-20 cm	1,86	0,30	4,30	1,75	39,39	2,24	1,03
20-30 cm	1,52	0,10	2,30	1,50	27,30	-0,60	2,09
Densidad Aparente del suelo (DAp) (g.cm⁻³)							
0-10 cm	1,55	1,20	1,70	1,60	5,82	4,15	-1,80
10-20 cm	1,56	1,40	1,70	1,60	4,92	-0,28	-0,24
20-30 cm	1,46	1,20	1,70	1,50	6,94	0,25	-0,10
Porosidad (PP) (%)							
0-10 cm	41,76	35,00	56,00	41,00	7,87	7,89	2,22
10-20 cm	41,49	36,00	48,00	41,00	6,27	0,09	0,28
20-30 cm	45,14	36,00	54,00	45,00	8,57	0,02	-0,11
Contenido de Humedad (Hg) (%)							
0-10 cm	9,74	5,60	13,50	9,80	15,49	1,39	-0,02
10-20 cm	9,58	5,30	12,90	9,70	15,42	0,98	-0,62
20-30 cm	8,58	5,50	13,00	8,40	20,84	-0,41	0,31
Velocidad Infiltración del agua (I) (cm.h⁻¹)							
.....	8,86	5,20	15,30	8,50	37,22	-0,53	0,76
Redimiendo de Granos (RG) (kg.ha⁻¹)							
.....	6.902	5.670	8.438		9,35	-0,18	0,26

*CV: Coeficiencia de Variación

Los valores máximos para la RMPS, fue registrado en la camada de 10-20 cm de profundidad, donde alcanzó 4,3 MPa de RMPS y el valor más bajo de RMPS, se registró en la camada de 20-30 cm de profundidad, que fue de 0,1 MPa.

En base a estos resultados se puede establecer que en el AE, la RMPS, fue aumentando 1,2 hasta los 20 cm de profundidad, y posteriormente estos valores fueron bajando. Sin embargo se observa que en todas las profundidades evaluadas se registran valores de RMPS que están por encima de 2 MPa, cuyos valores representan a suelos compactados, de acuerdo a lo establecido por Klein (2008), quien en base a

varias investigaciones, afirma que los niveles de RMPS a partir de los 2 MPa, presentan condiciones de compactación, dificultado el desarrollo del sistema radicular de las plantas, así mismo, USDA (2017), establece que los valores $> 2\text{MPa}$, son considerados altos y por lo tanto ya se consideran suelos compactados

Los niveles de RMPS observados en las capas superficiales en este estudio se puede deber al sistema de manejo del suelo (Siembra Directa), teniendo en cuenta que en este sistema se minimiza la remoción suelo (arado), sumado a esto la acumulación de materia orgánica que favorece el aglutinamiento de las partículas suelo, haciendo de esta manera que se aumente los microporos y disminuya los macroporos, principalmente en las capas superficiales.

En relación a la DAp también se observa el mismo comportamiento en el AE, es decir hasta los 20 cm de profundidad se presentan niveles altos de DAp, en promedio ($1,5 \text{ g.cm}^{-3}$), en base a lo establecido por USDA (1999), para un suelo con textura arenosa, quien establece que a partir de $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ de DAp puede dificultar el desarrollo del sistema radicular (compactado), sin embargo, a los 30 cm de profundidad en promedio presentan niveles ideales de DAp para un suelo arenosa ($1,4 \text{ g.cm}^{-3}$).

El comportamiento observado de DAp, puede ser influenciado por sistema de manejo del suelo (Siembra Directa), teniendo en este caso como referencia a Balbuena *et al* (2003), quienes estudiaron el comportamiento de la RMPS y DAp de suelos, también bajo manejo de siembra directa después de diferentes números de pasadas de maquinarias agrícolas, observaron que a medida que se aumenta el número de pasadas de maquinarias también aumenta los valor de RMPS y DAp, principalmente en la capa superficial, concluyendo además que el sistema de siembra directa no es capaz de limitar el nivel de compactación principalmente por la intensidad de tránsito en la producción agrícola.

Por lo tanto, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en este estudio, en las variables de RMPS y DAp, y también teniendo como referencia los resultados obtenidos por Balbuena *et al* (2003), se podría establecer que sistema de manejo es un factor que afecta al comportamiento de estas variables físicas.

Con lo expuesto, Rosa Filho *et al.* (2009), coinciden, afirmando que en el sistema de siembra directa, las condiciones de manejo, donde no se remueve el suelo, favorece la compactación, principalmente en la camada superficial, donde se presentan niveles altos de DAp y RMPS, y niveles bajos de porosidad, principalmente de macroporos.

Y justamente, esta investigación se observó que el contenido de porosidad (PP), presenta un comportamiento inverso a la RMPS y DAp, es decir, hasta los 20cm de profundidad se presenta niveles bajos de PP para un suelo arenoso, en promedio 41 %, y a los 30cm de profundidad ya se observa en promedio niveles ideales de PP (45%) (USDA 1999).

Los resultados observados en esta investigación en relación a la porosidad del suelo, se puede deber a la alteración física presentada en las camadas superficiales (Compactación), en consecuencia al tránsito de maquinarias, teniendo en cuenta lo establecido por Souza *et al.* (2006), quienes afirman que a consecuencia del tránsito excesivo se modifica el tamaño de los agregados, aumentando la densidad del suelo, la RMPS y disminuye la cantidad de poros.

El contenido de agua, en promedio presenta 9,7% y 9,5 % para las profundidades de 10 y 20 cm respectivamente, a los 30 cm el Hg bajó a un promedio de 8,5%, por lo tanto, la mayor acumulación de Hg se presentan los primeros 20 cm de profundidad, este comportamiento puede deberse principalmente al efecto de la evaporación del agua en el suelo, en la que el agua empieza a moverse a las capas más superficiales del suelo por gradientes térmicos, cuando el suelo está seco (Giráldez *et al.* 1999).

Los resultados observados en el contenido de agua en el suelo también pueden ser justificados porque el muestreo de suelo fue realizado 5 días después (5 de mayo de 2018), de una precipitación baja (5 mm) (Anexo 1), esta precipitación se produjo después de 18 días de la última precipitación registrada en la zona (15 de abril de 2018) (Anexo 1). El bajo contenido de agua en el suelo, hace que los 5mm de lluvia caída días antes del muestreo solo pudieron infiltrar y/o almacenar con mayor intensidad en los primeros 20 cm de profundidad del suelo.

La velocidad de infiltración (I), registrada en el AE, fue bastante baja, en promedio $8,86 \text{ cm.h}^{-1}$, considerando que para un suelo con textura arenosa la velocidad de infiltración debería estar en torno a los 30 cm.h^{-1} (Brouwer *et al.* 1988). La baja velocidad de infiltración de agua en el suelo puede deberse a las condiciones físicas del suelo registradas en la parte superficial de la misma, niveles altos de DAp, bajos contenidos de PP, etc.

En este sentido es importante mencionar que la baja infiltración de agua en el suelo, aumenta la escorrentía superficial (Erosión hídrica), en consecuencia disminuye el contenido de agua en el suelo y esto finalmente se traduce en un bajo rendimiento del cultivo (Da Silva y Teixeira 2017).

El rendimiento de granos de maíz (RG), en promedio alcanzó 6.902 kg.ha^{-1} , superando de esta manera el rendimiento promedio a nivel nacional, registrado en el año 2018, que fue de 5.526 kg.ha^{-1} (CAPECO 2019). La preparación del suelo (Sistema conservacionista), pudo haber influenciado en los altos rendimientos que se obtuvo en esa investigación, en este sentido Oliveira *et al.* (1996), citado por Pinheiro (2005), establece que en un sistema conservacionista se obtiene mayor rendimiento de granos en comparación a un sistema convencional, esto se debe principalmente a que en un sistema conservacionista se mejora las condiciones del sistema edáfico como la retención de agua, disponibilidad de nutrientes, etc.

Por tal motivo, se puede establecer que el manejo del suelo, de alguna manera puede contrarrestar, en los resultados promedios del rendimiento de granos del maíz, los efectos negativos que puedan causar las degradaciones físicas del suelo (compactación), es decir, niveles altos de RMPS y DAp.

4.2.2 Correlación existente entre las variables físicas del suelo con el rendimiento de granos de maíz

Los resultados obtenidos en el análisis de correlación entre las variables físicas del suelo y el rendimiento de granos de maíz se presentan en la tabla 11, en este sentido, es importante destacar que, el rango de estos coeficientes de correlación (r) va de -1 (correlación inversa) a +1 (correlación directa), y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables.

Los valores del rendimiento de granos en relación a RMPS, DAp, PP, Hg y I presentaron una correlación nula a baja en todas las profundidades evaluadas. Estos resultados demuestran que existe una baja correlación del rendimiento de granos en función a las demás variables físicas analizadas (Kitamura 2004).

Tabla 11. Correlación de Pearson existente entre las variables de Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS), densidad aparente del suelo (DAp), porosidad total del suelo (PP), contenido de humedad (Hg), velocidad de infiltración del agua (I) con el rendimiento de granos de maíz (RG). Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

Rendimiento de granos (RG) (kg.ha ⁻¹)	Resistencia	Densidad	Porosidad	Contenido de	Velocidad de
	Mecánica a la Penetración del Suelo (RMPS) (MPa)	Aparente del Suelo (DAp) (g.cm ⁻³)	total del suelo (PP) (%)	Humedad en el Suelo (Hg) (%)	Infiltración del Agua (I) (cm.h ⁻¹)
	PROFUNDIDAD DE 0 a 10 cm				
	-0,12	-0,22	0,14	0,15	0,28
	PROFUNDIDAD DE 10 a 20 cm				
	-0,06	-0,14	0,29	0,12
	PROFUNDIDAD DE 20 a 30 cm				
	-0,04	-0,29	0,25	0,43

Es importante mencionar que el RG en relación a la RMPS y DAp, pese a que los valores sean nulos (negativos) en todas las profundidades, nos indica que a medida que aumentan los valores de RMPS y DAp en el suelo decrecen los valores de rendimiento de granos o viceversa.

Estos resultados se debe principalmente a que en suelos compactados, es decir, suelos con valores altos de RMPS y DAp, afectan negativamente el buen desarrollo de sistema radicular, y por consiguiente, la asimilación óptima de nutrientes y aguas que se encuentran disponibles en el suelo.

En cambio, en relación a las variables de PP, Hg e I, a pesar que los valores son nulos o bajos, presentan una correlación positiva en todas las profundidades evaluadas, es decir, a medida que aumenta los valores de PP, Hg e I, también los valores de RG tiende a aumentar.

Estos resultados se pueden justificar en que en un suelo con mayor contenido de espacios porosos (PP), facilita más el flujo de nutrientes y agua, y esto trae como resultado mayor disponibilidad de nutrientes y aguas para la planta, pudiendo el cultivo de maíz, en este caso, optimizar su nutrición, y expresar más eficientemente su potencial productivo.

4.2.2 Análisis geostatístico de las variables físicas del suelo

Realizado ajustes necesarios a los datos para la distribución normal, se confeccionaron los semivariogramas para las variables analizadas. Siendo así posible determinar los parámetros de alcance (A_0), que expresa la distancia límite de dependencia espacial y la dependencia espacial $[C/(C_0+C)]$, que indica el cuanto de la variación total de los datos es explicada por la continuidad espacial (Tabla 12).

En base a los parámetros establecidos por Cambarella *et al.* (1994) y los resultados obtenidos en el análisis geostatística, se puede afirmar que para las variables RMPS, en las profundidades de 0-10 cm y de 20-30 cm, el contenido de humedad (Hg), en la profundidad de 20-30 cm, y la velocidad de infiltración (I), presentaron una dependencia espacial baja entre los valores vecinos (efecto pepita puro).

Estas observaciones puede deberse a la técnicas de muestreo adoptados (distancia de muestreo), lo cual no permitió detectar dependencia espacial para estas variables (Viera 2000). Por lo tanto el estudio de este tipo de variabilidad (aleatoria), se adopta las herramientas de la estadística clásica (Silva *et al.* 1988) por ese motivo para esos grupos de datos fue efectuada una interpolación por el método de inversa a la distancia.

Para las demás variables y profundidades estudiadas se observó en los datos modelos exponenciales y esféricos, demostrando todas dependencias espaciales altas, pudiendo aplicar geostatística sobre dichos valores y según Vieira (2000), esto permite la interpolación de los valores por el método de Krigagem, a fin de estimar los valores de las propiedades estudiadas para localidades donde no fueron evaluadas.

Tabla 12. Parámetros de los modelos de semivariogramas para la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS); Densidad Aparente del suelo (DAP); Porosidad total del suelo (PP); Contenido de humedad (Hg) en las profundidades estudiadas; Velocidad de infiltración del agua (I), y Rendimiento de Granos (RG). Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

Profundidad	Modelo	Efecto pepita (Co)	Meseta C1 + Co	Alcance Ao (m)	Co/C1 + Co (%)	Dependencia Espacial
Resistencia a la Mecánica a la Penetración del Suelo (RMPS)						
0-10 cm	Ef. Pepita	-----	-----	-----	-----	-----
10-20 cm	Esférico	0,000	0,196	143	0,050	Alta
20-30 cm	Ef. Pepita	-----	-----	-----	-----	-----
Densidad Aparente del suelo (DAP)						
0-10 cm	Esférico	0,000	0,008	190	0,120	Alta
10-20 cm	Exponencial	0,001	0,009	336	6,720	Alta
20-30 cm	Esférico	0,000	0,010	213	0,090	Alta
Porosidad (P) (%)						
0-10 cm	Esférico	0,010	11,460	276	0,090	Alta
10-20 cm	Esférico	2,080	14,600	1,464	14,250	Alta
20-30 cm	Esférico	0,010	15,390	209	0,060	Alta
Contenido de Humedad (Hg)						
0-10 cm	Esférico	0,001	2,343	192	0,040	Alta
10-20 cm	Esférico	0,001	2,309	233	0,040	Alta
20-30 cm	Ef. Pepita	-----	-----	-----	-----	-----
Velocidad Infiltración del agua (I)						
.....	Ef. Pepita	-----	-----	-----	-----	-----
Redimiendo de granos (RG) (kg.ha⁻¹)						
.....	Esférico	123.000	850.200	1.437	14,470	Alta

4.2.3 Mapas de distribución espacial de las propiedades físicas del suelo

En base al análisis de los parámetros de los modelos de semivariogramas se establecieron los métodos de interpolación a cada variable para la elaboración de mapas de distribución espacial de RMPS, DAP, PP, Hg, I y RG, cuyas informaciones se pueden analizar visualmente en las Figuras 16 al 21 respectivamente.

En base a lo establecido por Klein *et al.* (1998), quienes afirman que a partir de los 2 MPa comienzan a restringir el crecimiento del sistema radicular de las plantas. Se establece para la discusión de este trabajo considerar suelos compactados a partir de 2 MPa de RMPS.

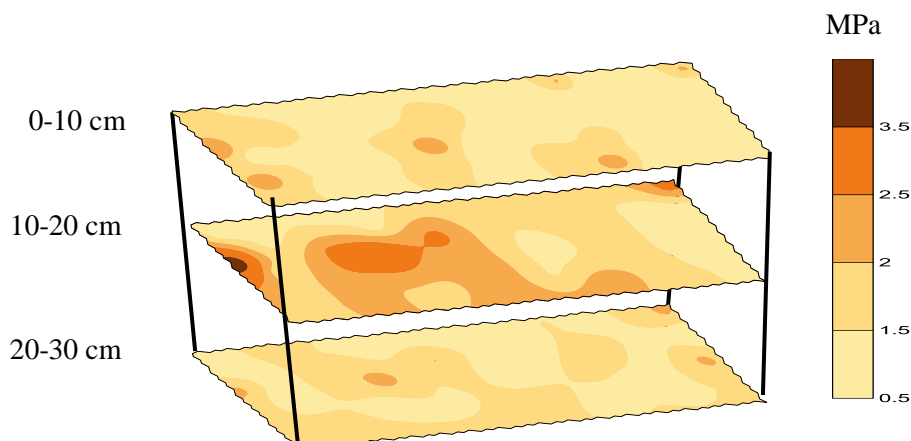


Figura 16. Mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (MPa), Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

En el mapa de distribución espacial de la Resistencia mecánica a la penetración (RMPS) (Figura 16), se observa que la primera camada evaluada (0-10 cm), el 85% del AE (26 ha), no presenta niveles de compactación y solo el 15% (5 ha), presenta niveles de compactación (RMPS > 2 MPa). En la camada de 10-20 cm, se observa un aumento de los niveles de RMPS, donde el 67% del AE (23 ha) presenta niveles no compactados (RMPS < 2 MPa), y el resto del AE (8 ha) presenta niveles de compactación (RMPS > 2 MPa), registrando valores máximos de RMPS > 3,5 MPa, donde la distribución espacial de las zonas compactadas se presenta de manera aleatoria dentro del AE, este comportamiento de la variabilidad espacial puede deberse al tránsito no controlado de maquinarias durante todo el ciclo de las producciones agrícolas establecidas en el AE, en este sentido el informe presentado por la Central Nacional de Cooperativas (UNICOOP, 2015), en nuestro país, se establece que el uso de rastrones y otros implementos de remoción de suelos están comprometiendo la calidad de las propiedades físicas del suelo.

En la camada de 20-30 cm de profundidad, nuevamente los niveles de RMPS fueron bajando, donde 90% del AE (28 ha) presente niveles no compactados (RMPS < 2 MPa), y sólo un total de 3 ha presenta niveles compactados (RMPS > 2MPa), también con una distribución espacial aleatoria dentro del AE.

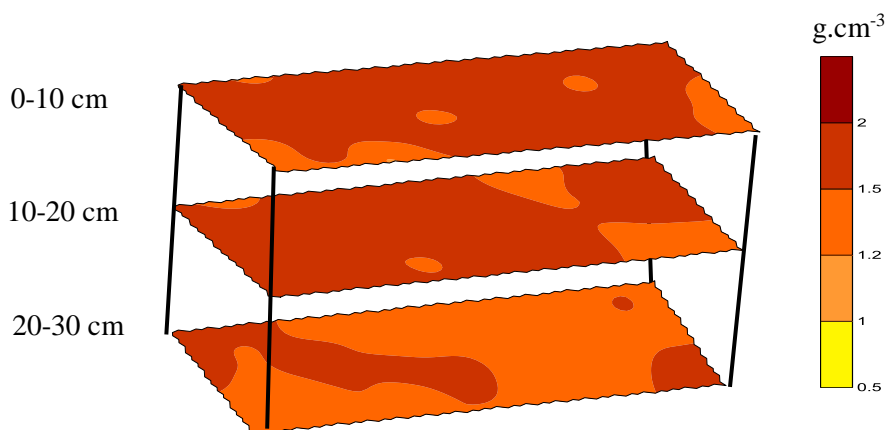


Figura 17 Mapa de distribución espacial de la Densidad Aparente del suelo (DAP) ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

La distribución espacial de la DAP del suelo (Figura 17) se comporta de la misma manera que la RMPS, es decir, hasta los 20 cm el AE presenta la mayor parte niveles altos de DAP, superado el nivel ideal ($> 1,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), que pueden ser considerados áreas compactadas, en base a los parámetros establecidos por USDA (1999), para suelos con textura arenosa. En la camada de 10 cm y 20 cm de profundidad, se presenta un total de 25 ha (81%), de total del AE, una DAP que se encuentra entre $1,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y $2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Sin embargo, en la camada inferior (30 cm de profundidad), la mayor parte del área (73%), presenta una DAP por debajo de $1,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Por otro lado, en relación al contenido de porosidad total del suelo (PP), USDA (1999), establece que para los suelos con textura arenosa el contenido de porosidad ideal es de 45%, en base a eso y analizando el mapa de distribución espacial de del contenido de poros en el suelo (Figura 18), donde se observa que en la primera camada evaluada (0-10 cm), el 84% del AE (26 ha), presente contenido de poros por debajo de lo ideal para un suelo arenoso ($\text{PP} < 45\%$) y solo el 16% del AE, lo que corresponde a 5 ha cuenta con el contenido de poros ideales, posteriormente en la camada de 10-20 cm el bajo contenido de poros del suelo se acentúa más, donde se observa que el 89% del AE presenta niveles por debajo del contenido ideal de poros, y solo 3 ha del AE (11%), presenta niveles ideales de contenido de poros ($\text{PP} > 45\%$), el contenido reducido de poros del suelo en estas camadas puede deberse a la compactación del

suelo, tal como lo establece Klein *et al.* (1998), que a medida que aumenta la compactación se reduce los espacios porosos del suelo.

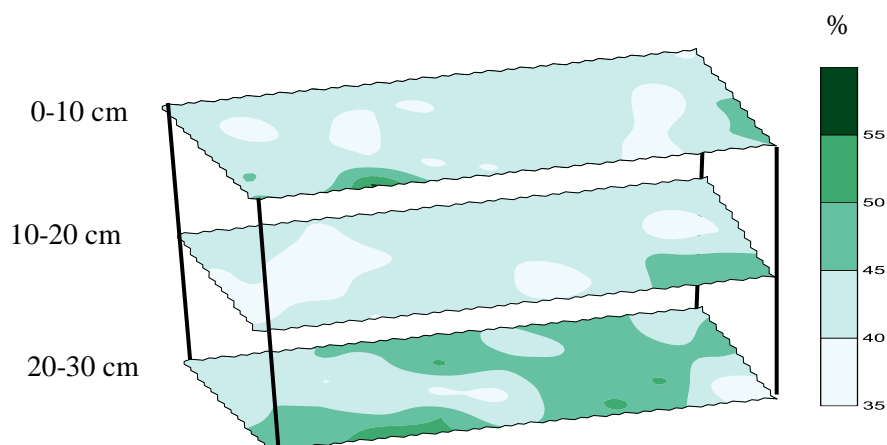


Figura 18. Mapa de distribución espacial de la Porosidad total del suelo (PP) (%), Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

Sin embargo a los 20-30mm de profundidad, se observa que la mayor parte del AE (55%) presente contenidos ideales de poros (PP > 45%). Por lo tanto el AE hasta los 200mm de profundidad el suelo presenta alteraciones significativas en cuando al contenido de poros lo cual guarda una relación inversamente proporcional con los niveles de RMPS observadas en el AE, es decir, en las capas en las que se registraron mayor RMPS, se observa menor contenido de poros.

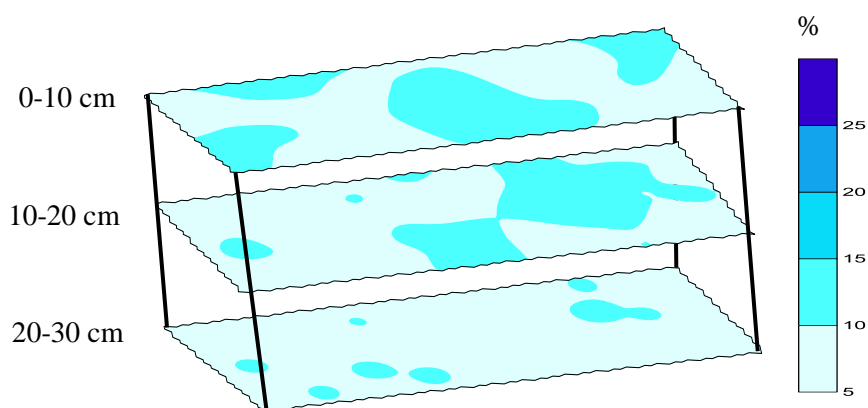


Figura 19. Mapa de distribución espacial del Contenido de Humedad (Hg) (%), Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

En el mapa de distribución espacial del contenido de humedad (Hg) (Figura 19), se puede observar que en la primera camada evaluada (10 cm de profundidad), la mayor parte (57%) del AE, presenta un Hg por debajo de los 10%. En la camada

inferior (a los 20 cm de profundidad), el 59 % del AE presenta Hg por debajo de los 10%.

A los 30 cm de profundidad, se observa que disminuye el Hg, donde el 78% del AE, presenta Hg por debajo de los 10%. Indicando de esta manera una tendencia a disminuir el Hg a mayor profundidad.

El comportamiento de la Hg en el suelo puede deberse a varios factores, por ejemplo al factor atmosférico, a las condiciones del suelo (factores edafológicos) o bien al gradiente térmico, los cuales hicieron posible el ascenso del agua hacia las capas superficiales del suelo (Giráldez *et al* 1999).

Por otro lado, Matisso *et al* (2014), quienes evaluaron la retención del agua en el suelo y el rendimiento de maíz en diferentes manejos de suelo, constataron que el sistema de siembra directa tiene mayor capacidad de retención de agua y posee menor valor de agua higroscópica, este último no se encuentra disponible para las plantas y por lo tanto no afecta el rendimiento del maíz.

En el mapa de distribución espacial de la velocidad de infiltración (I) (Figura 20), se observa que el AE presenta una I muy por debajo de los valores ideales establecidos para un suelo arenoso (25 cm.h^{-1}) (USDA 1999), donde el 76 % del AE (24ha), presenta una I por debajo de 10 cm.h^{-1} .

El 24% (7 ha), presenta una I por encima de 10 cm.h^{-1} , de los cuales solamente el 3,4 ha, lo que corresponde al 11% del AE, registran una I que llega a los 15 cm.h^{-1} . De esta manera se establece en este estudio que la I presenta condiciones desfavorables para el desarrollo de los cultivos.

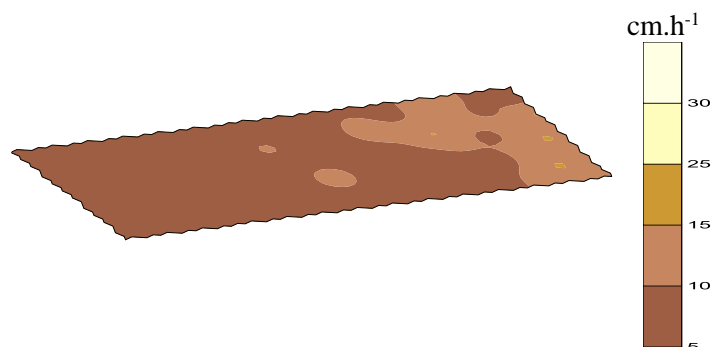


Figura 20. Mapa de distribución espacial la Velocidad de infiltración del agua en el suelo (I) (cm.h^{-1}), Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

Las condiciones de I registradas en el AE, puede justificarse de manera directa con los niveles altos de DAp y RMPS, y el bajo contenido de poros del suelo presentada en la camada superficial (0-20cm de profundidad).

En el mapa de rendimientos de granos (RG) de maíz (Figura 21), se puede observar que la distribución espacial de la misma se presenta de manera homogénea en la que el rendimiento promedio fue de 6.902 kg.ha⁻¹. Sin embargo analizando de manera más precisa la variación a nivel espacial se puede observar que el 74% del AE, lo que corresponde a un total de 25 ha, presentó un rendimiento de superior 6.500 kg.ha⁻¹ y solo el 26% (8 ha), presentó rendimientos por debajo del rendimiento promedio.

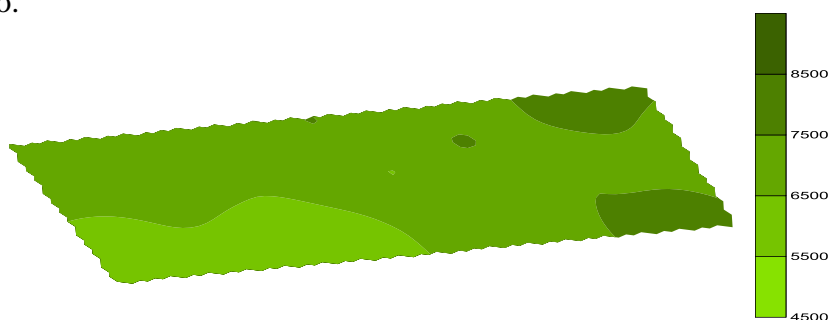


Figura 21. Mapa de distribución espacial del Rendimiento de granos (RG) de maíz, en kg.ha⁻¹. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

Comparando los mapa de distribución espacial de RMPS y PP con RG se puede observar que en las áreas donde se presenta mayor RP y menor PP, el RG fue menor, por lo tanto en base al análisis de la distribución espacial se puede establecer que existe una relación inversa del RG con la RMPS y una relación directa en relación a la variable porosidad (PP).

La preparación del suelo (Sistema conservacionista), pudo haber influido en los altos rendimientos que se obtuvo en esa investigación, en este sentido Oliveira *et al.* (1996), citado por Pinheiro (2005), establece que en un sistema conservacionista se obtiene mayor rendimiento de granos en comparación a un sistema convencional, esto se debe principalmente a que en un sistema conservacionista se mejora las condiciones del sistema edáfico como la retención de agua, disponibilidad de nutrientes, etc.

Por otro la preparación de suelo (tránsito de maquinarias), influencia en la porosidad y en la DAp de suelo, principalmente en la camada de 0 a 10 cm de profundidad, y en relación a la RMPS, la influencia se ve hasta los 30 cm de profundidad, en base a los estudios realizados por Milton *et al.* (2016).

Los mismos autores en su experimento evaluaron el efecto de las propiedades físicas del suelo en las características agronómicas del maíz en suelo con textura arenosa, donde observaron que la RMPS con valores superior a 1,5 MPa reduce ligeramente la producción de materia seca de la planta y el rendimiento de granos, y valores por encima a 2 MPa, reduce la materia seca de las raíces.

Así mismo Schenatto *et al.* (2016), evaluaron la distribución espacial de la RMPS y su relación con el RG en un manejo de siembra directa, y los resultados demostraron que la RMPS y RG presenta una relación inversa en las profundidades de 10-20 cm y de 20-30 cm, no presentando influencia los valores de RMPS de la profundidad de 0-10cm en el RG.

Atendiendo estos resultados se podría establecer la necesidad de escarificar los suelos compactos en un sistema de siembra directa, para mejorar el rendimiento de granos, en este sentido, Da Silva y Teixeira (2017), evaluaron el efecto de la compactación en el rendimiento de maíz en diferentes manejos de suelo: siembra directa y siembra directa con escarificación, observaron mayor rendimiento en suelos bajo sistema de siembra directa escarificado.

En también importante mencionar en este punto, que la influencia de la escarificación sobre la degradaciones física del suelo (principalmente compactación), permanece aproximadamente, un año después de la escarificación (Barreto 2004). Esto nos indica que el manejo por escarificación se debería de realizar cada año para mantener en condiciones adecuadas las propiedades físicas del suelo y optimar el rendimiento de granos.

5. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones edafoclimáticas y la metodología aplicada para este estudio se establecen las siguientes conclusiones:

El área de estudio (349 ha) presentan niveles altos de resistencia a la penetración ($RP > 2\text{MPa}$), en las capas superficiales (0 a 20 cm de profundidad).

El área de estudio de la segunda etapa de la investigación (31 ha), presenta niveles altos de resistencia mecánica a la penetración del suelo ($RMPS > 2\text{MPa}$) y densidad aparente ($DAp > 1,5\text{ g.cm}^{-3}$) en la profundidad de 0 a 20 cm.

El contenido de agua en suelo (Hg) en las capas superficiales (0 a 20 cm de profundidad) presenta áreas con mayor contenido (10% de humedad) en relación a capas inferiores.

Los niveles registrados de Porosidad total (PP) y de Velocidad de infiltración (I) en las capas superficiales (0 a 20 cm de profundidad) fueron bajos, considerando la textura del suelo (arenosa).

Todas las propiedades físicas evaluadas presentan valores con una distribución espacial heterogénea en todas las profundidades evaluadas, es decir, no presentan áreas individualizadas (valores homogéneos) de manera significativa.

El rendimiento de granos (RG) presenta en un 75% del área de estudio valores superiores a 7.500 kg.ha^{-1} , valores que se distribuyen más homogéneamente en relación a la distribución espacial de los atributos físicos del suelo, observándose una ligera disminución de rendimiento de granos en relación a las áreas compactadas ($RMPS > 2\text{MPa}$), ($DAp > 1,5\text{ g.cm}^{-3}$) y ($PP < 45\%$).

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Balbuena, R.; Botta, G.; Draghi, L.; Rosatto, L.; Dagostino, L. 2003. Compactación de suelos. Efectos del tránsito del tractor en sistemas de siembra directa. Dpto. de Ingeniería Rural. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales UNLP, La Plata. (AR).p1-9.

Beltrame, L. F. S. et al. 1981. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 5, p. 145-149.

Bonnin, J.J, Lanças, K., 2014. Análisis de mapas de iso-compactación del suelo para el diagnóstico de la Necesidad de subsolado de un área comercial de siembra directa, Investigación Agraria, v. 11 n 2, p 8-10

Borges, A. et al. 1999. Alteração de propriedades físicas e atividade microbiana de um Latossolo Amarelo álico após cultivo com fruteiras perenes e mandioca. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 23, p. 1019-1025.

Borghi, E. Comportamento da cultura do milho (*Zea mays* L.) em diferentes sistemas de manejo do solo, população de plantas e adubação. Ilha Solteira, 2001. (Tesis). Engenharia Agrônômica. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. 97p.

Bouma, J. et al. 1999. Pedology, precision agriculture, and the changing paradigm of agricultural research. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.63, n.6, p 1763-1768.

Burgess, T.M.; Webster, 1980. R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties I - The semivariogram and punctual kriging. Journal of Soil Science, Madison, v.31, n.2, p.315-31.

Brammer, H. 2000. Ploughpans and tillage problems. Brammer, H In: Agroecological aspects of agricultural research in Bangladesh. p.151-158. Dhaka: UPL.

Brouwer et al. 1988. INFILTRACIÓN Guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo (En línea). Consultado el 10 de nov. 2018. Disponible en: file:///D:/Descargas/Didactic_material-SP-Protocols-2013-1.Infiltracion.pdf

CAN (Censo Nacional Agropecuario).2008.Ministerio de Agricultura y ganaderia.Vol.4.Consultado el 15 de set 2019.Disponible en: <http://www.mag.gov.py/Censo/Book%20Vol4.pdf>.

CAPECO (Cámara Paraguaya de Exportadores y Comercializadores de Cereales y Oleaginosas). 2019. Área de siembra, producción y rendimiento de maíz.(En línea). Consultado el 16de set. 2019. Disponible en: <https://capeco.org.py/area-de-siembra-produccion-y-rendimiento/>

CNR (Comisión Nacional de Riego). 2017. Infiltración del agua en el suelo. Consultado 10 de nov del 2018. Disponible en: http://agriculturers.com/wp-content/uploads/2017/12/S106_Cartilla_Infiltracion_del_agua_en_el_suelo.pdf

Cambardella, C. A.; Moorman, T. S.; Novak, J. M.; Parkin, T. S.; Karlen, O. L; Turco, R. F.; Konopka, A. E. 1994. Field scale variability of soil properties in central lowa soils. *Soil Science Society of America Journal*. v. 58, n. 5. p. 1501-1511.

Castro, O. 1995. Comportamento físico e químico de um latossolo Roxo em função do seu preparo na cultura do milho (*Zea mays* L.). Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Curt, M. 2006. *Enciclopedia Práctica de la Agricultura y Ganadería*. Barcelona, ES. Editorial Océano. 1032 p.

Da Silva, A.; Teixeira, R. 2017. Simulação do efeito da compactação do solo na produtividade em diferentes manejos em latossolo vermelho distroférrico. Apresentado no XLVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA 2017 - Maceió - AL, (BR).

Delgadillo, O.; Pérez, L. 2016. Medición de la infiltración del agua en el suelo. Consultado el 10 de nov. 2018. Disponible en: http://www.centro-agua.umss.edu.bo/wp-content/uploads/2017/05/2016_Medicion_infiltracion_doble_anilla.pdf.

Dicovskiy R., L.M. 2008. *Estadística Básica* (En línea). Universidad Nacional de Ingeniería. UNI-NORTE. Estelí. Nicaragua. Consultado el 20 de oct. 2018. Disponible en:http://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/2101/mod_resource/content/0/DEPOSITO_DE_MATERIALES/estadistica1_1.pdf

Dos Santos, D., Souza, E., Nobrega, L., Bazzi, C. L., Goncalves, A. 2012. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. Campina Grande, PB, UAEA/UFCG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.16, n.8, p.843–848.

FAO. 2015. Fertilidad del suelo. Conservación de los recursos naturales para una Agricultura sostenible. Consultado 21 nov. 2017. Disponible en: http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spganish/sf/soil_fertility.pdf

FAO. 2017. Propiedades Físicas del Suelo. Consultado 23 nov. 2017. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>.

Frogbrook, A. 2002. Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil Bogusław Usowicz, Jerzy Lipiec. Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Lublin, Poland. Doświadczalna 4, p. 20-290

Freddi, O.S.; Carvalho, M.P.; Veronesi Jr.V.; Carvalho, G. 2006. J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. Eng. Agríc. Jaboticabal, v. 26, n. 1, p.113-121.

García, I.; Sánchez, M.; Vidal, M.; Bentancourt, Y. 2010. Efecto de la compactación sobre las propiedades físicas del suelo y el crecimiento de la caña de azúcar. Consultado 21 de oct 2017. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542010000200009.

Giráldez, J.V.; Vanderlinden, K.; Ten berge, H. F.1999. La evaporación del agua del suelo bajo control atmosférico (En línea). Consultado el 16 de set. 2018. Disponible en: https://abe.ufl.edu/faculty/carpena/files/pdf/zona_no_saturada/estudios_de_la_zona_v4/iv-07.pdf.

Goedert, W. J.; Schermack, M. J.; Freitas de, F. C.2002. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.37, p.223-227.

Gómez, J.; De sá, M.; Hurtado, S.; Rein, T.; Shoso, L. 2008. Variabilidade espacial da resistência á penetração perfil do solo sob semeadura direta e preparo convencional. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Boletim de pesquisa e desenvolvimento 208. ISSN 1676-918X. Planaltina, DF.(BR). p. 14.

Gomes, F. P.; Garcia, C. H.2002. Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais, Piracicaba: FEALQ. 305p.

Glinski, J & J Lipiec. 1990. Soil Physical Conditions and Plant Roots. CRC Press Inc. Boca Ratón, Florida, USA. 250 pp.

Hamza, M. A.; Anderson, W. K.2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. Soil and Tillage Research, v.82, p.121-145, 2005.

Hang, S. Curso Edafo. 2014. Consultado 19 nov. 2017. Disponible en: http://blog.ucc.edu.ar/edafologia/files/2014/08/Teorico-2_Propiedades-fisicas_ucc_14.pdf.

Imhoff, S.; Silva, A.P.; Dias Junior M.S. & Tormena, C.A. 2001. Quantificação de pressões para o crescimento das plantas. R. Bras. Ci. Solo, 25:11-18.

Johnson, R.M.; Richard Junior, E.P. 2005. Sugarcane yield, sugarcane quality, and soil variability in Louisiana. Agronomy Journal. Madison, v.97, n.3, p.760-771.

Keller, T. 2004. Soil compaction and soil tillage studies in agricultural soil mechanics, Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas), Universidad Sueca de Ciencias Agrícolas, Uppsala, Suecia.

Kiliç, K.; Özgöz, E.; Akba, F. 2004. Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two úvents in Turkey. Soil and Tillage Research, v.76, p.1-11g.

Kitamura, E. A. 2004. Inter-relações da variabilidade especial da granulometria do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. 109 f. Disertación (Maestria en Sistemas de Producción) - UNESP, Ilha Solteira.

Klein, VA. 2008. Física del suelo. Brasil, BR. Editorial UPF Universidad de passo Fundo. 212 p.

Landim, P. M. B. Análise estatística de dados geológicos. São Paulo:UNESP, 1998. 226 p.

Lima, R.2007. Produtividade de Forragem do Milho em Função de Atributos Físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico sob Plantio Direto. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidade: Sistemas de Produção Dissertação (mestrado). p. 66-73

Lopez, O; Gonzalez, E; Molinas, A.; Franco, E.; Garcia, S.; Rios, E. 1995. Estudio de reconocimiento de suelos, capacidad de uso de la tierra y propuesto de ordenamiento territorial preliminar de la región oriental del Paraguay. Asunción, PY. v.1.p.83.

Matiasso, S.; Tortelli, G.M.; Vieira, M.L. 2014. Curvas de retenção de água e rendimento de milho em plantio direto e escarificado. Pelotas.RS (BR). X Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo Fatos e Mitos em Ciência do Solo.

Megda, M. M.; Carvalho, M. P.; Vieira, M. X.; Andreotti, M.; Pereira, E. C.2008. Correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um Latossolo Vermelho de Selvíria (MS). Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.781-788, 2008.

Mello Prado, R.; Torres, J. L. ; Garcia, C.; Coan, O. 2001. Semente de milho sob compressão do solo e profundidade de Semeadura: influência no índice de velocidade de emergência. São Paulo. BR. DOI: 10.5380/rsa.v2i1.p.977

Moraes, M; Da silva, V.; Zwirtes A.; Carlesso, R. 2014. Utilização de penetrômetros na agricultura: uma revisão. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.34, n.1, p.179-193.

Molin, J.P. 1998. Utilização de GPS em agricultura de precisão. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v17, n3, p121.

Molin, J. P., Mazotti, H. C. 2000. Influência da utilização e do tipo de amortecedores de ricochete em ensaios de aplicadores a lanço. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.4, n. 2, p. 281 – 5.

Mzuku, M. et al. 2005. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones. Soil Science Society American Journal, Madison, v.69, n.5, p.1572-1579.

Ortigoza G., J.; López T., C.;Gonzalez V., J. 2019. Guia Técnica: Cultivo de maíz (E línea). San Lorenzo, PY. p 48.Consultado 16 set.2019. Disponible en: https://www.jica.go.jp/paraguay/espanol/office/others/c8h0vm0000ad5gke-att/gt_04.pdf

Pinheiro, L.2003. Análise espacial da ocorrência do índice de cone em sistemas de semeadura direta e sua relação com fatores relacionados a física do solo. Piracicaba. SP, (BR).p.1-69.

Porta Casanelas, J; Acevedo Reguerín, M; De Laburu, C. 2003. Edafología: para la agricultura y el medio ambiente. 3 ed. Mexico. Mundi – Prensa. 929 p.

Ramirez-Lopez, L.; Reina-Sánchez, A.; Camacho-Tamayo, J. H. 2008. Variabilidad espacial de atributos físicos de un Typic Haplustox de los Llanos Orientales de Colombia. Ingeniería agrícola, v.28, p.55-63.

Reinert, D; Reichert, J; Silva. V. 2001. Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado. In: Carlesso, R.; Petry,M.T.; Rosa, G.M.; Ceretta, C.A. e ds. Irrigação por aspersão no Rio Grande do sul. Santa Maria, RS, p.165.

Ros, V., Souza, C.,Vitorino, A., Rafull, L. 2011. Resistência de um latossolo vermelho distroférico à penetração em sistema plantio direto após semeadura. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.31, n.6, p.1104-1114.

Rosa Filho, G.; Carvalho, M. P.; Andreotti, M.; Montanari, R.; Binotti, F. F. S.; Gioia, M. T. 2009. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.33, p.283-293.

Rosolom, C.A.; Fernandez, E.M.; Andreotti, M.; Costa, C. 1999. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.34, n.5, p.821-828.

Rucks, L; García, F; KapláN, A;Ponce de León, J; Hill, M. 2004. Propiedades Físicas del Suelo. Montevideo,(UR). Facultad de Agronomía Universidad de la república dpto. Suelos y aguas.16p. Consultado 16 oct.2017. Disponible en: <http://bibliofagro.pbwGorks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>.

Schaffrath, V. R.; Tormena, C. A.; Gonçalves, A. C. A.; Fidalski, J. 2008. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.1369-1377.

Schenatto, K.; De Souza, E.; Bazzi, C.; Schenatto, K.; Leonardo, L. 2016. Variabilidade espacial da resistência do solo a penetração e sua correlação com a produtividade do milho. Apresentado no XLV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2016. Florianópolis - SC, (BR).

Souza, L.S.; Cogo, N.P.; Vieira, S.R. 1997. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em pomar cítrico. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, Campinas, v.21, p.367-372.

Souza, Z.M.; Silva, M.L.S. ; Guimarães, G.L; Campos, D.T.S.; Carvalho, M.P.; Pereira, G.T. 2001. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). *R. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, v.25, n.3, p.699-707.

Sparovek, G.; Schnug, E. 2001. Soil tillage and precision agriculture: A theoretical case study for soil erosion control in Brazilian sugar cane production. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.61, n.1-2, p.47-54.

Taboada, MA; Alvares CR. 2008. *Fertilidad Física de los suelos*. 2ed. Buenos Aires, Argentina. Facultad de Agronomía. 227 p.

UNICOOP (Central Nacional de Cooperativas), 2015. *Buenas prácticas agrícolas*. Santa Rita, PY. 76p. Consultado 22 de jul .2018. Disponible en: <http://www.unicoop.com.py/admin/archivos/manual-de-buen-manejo-de-suelos-en-la-produccion-de-granos.pdf>.

USDA “Departamento de Agricultura de los Estados Unidos” 1999. *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. Argentina.

USDA “Departamento de Agricultura de los Estados Unidos” 2017. *Soil survey manual*. USA. n°18. p 587.

Valente, I.; Araujo, A.; Suda, L.; Cavassini, V.; Lopes, J. 2015. Produtividade do milho e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto. Apresentado no XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2015 - São Pedro – SP, (BR).

Vieira, S. R. 2000. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R. F.; Alvarez V, V. H.; Schaefer, C. E. G. R. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, p. 1-54.

Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: *Applications of soil physics*. New York, Academic Press, 385 p.

William, R.; Eiji, E.; Menezes de Souza, Z.; Bizari, D.; Souza, A. 2007. Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. R. Bras. Ci. Solo, 32:1827

7. ANEXO

1A. Datos de precipitación por día (mm), registrada en el año 2018 (periodo de la investigación). En el Distrito de Villa del Rosario, Dpto. San, proveído por Cooperativa Volendam 2019.

Año 2018												
Día/Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	110	0
2	110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0
4	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	105	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45	0	0
11	20	0	0	0	45	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	47	0	0	0
14	52	0	0	0	0	0	0	5	0	0	57	0
15	5	0	0	7	22	0	0	0	0	0	0	0
16	15	10	0	0	0	0	0	0	60	0	0	15
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0
18	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0
19	0	120	16	0	30	0	0	0	6	0	0	0
20	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	5	15	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	35	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	75	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	12	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	35	0	0	0	30	0	0	0	0	22	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	0
31	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	227	192	73	7	97	95	5	20	193	185	284	15

2A Datos de contenidos de agua en el suelo (%), durante la medición de RMPS de las diez parcelas evaluadas. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

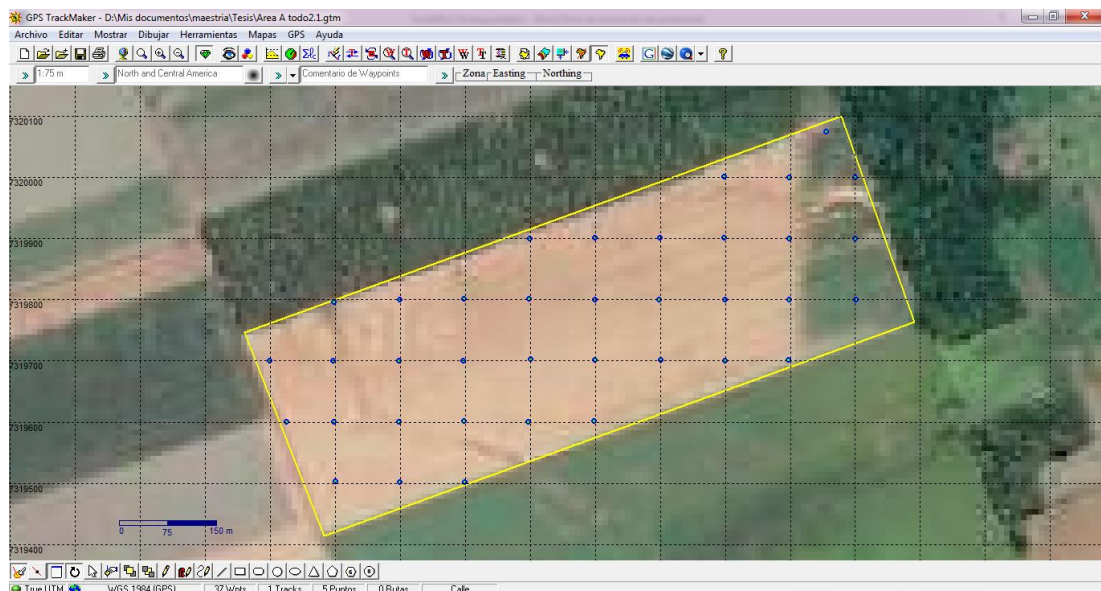
Puntos de muestreo	Parcelas									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1	14	16	25	13	18	14	8	6	10	9
2	11	12	11	8	14	13	6	7	18	6
3	14	15	17	7	15	14	6	11	14	13
4	21	13	11	10	13	12	5	10	7	10
5	8	13	14	9	21	13	4	9	15	13
6	13	9	15	14	20	14	3	4	11	6
7	10	12	13	11	14	11	3	9	10	8
8	5	9	7	11	15	12	7	13	10	17
9	5	12	14	15	13	12	3	7	11	17
10	11	10	12	10	11	11	6	8	15	12
11	6	10	16	15	12	13	9	16	9	9
12	9	10	15	12	14	13	4	5	13	5
13	5	9	15	11	14	22	6	6	8	9
14	9	10	18	10	22	9	6	4	10	8
15	10	12	13	12	13	10	7	12	12	2
16	6	7	11	12	17	13	4	4	11	7
17	8	11	18	10	17	11	10	5	10	9
18	10	8	11	16	14	15	3	4	10	16
19	11	10	13	12	12	14	2	2	10	10
20	13	11	17	10	16	17	9	8	19	6
21	8	10	20	11	14	13	6	8	13	3
22	7	10	8	14	15	9	5	12	8	15
23	6	17	15	13	11	13	6	8	10	6
24	8	10	13	11	12	12	3	6	6	5
25	11	9	15	7	20	14	5	2	9	11
26	11	23	14	10	17	12	6	1	7	12
27	7	12	11	8	19	18	7	7	12	14
28	7	11	11	11	15	11	4	15	12	6
29	0	11	16	8	14	15	4	4	9	5
30	10	16	24	18	14	15	5	12	12	8
31	6	10	22	12	16	28	2	6	-	-
32	10	9	15	19	15	16	4	9	-	-
33	6	13	12	10	13	12	-	-	-	-
34	12	8	12	13	16	11	-	-	-	-
35	10	9	17	11	14	14	-	-	-	-
36	10	12	15	11	11	16	-	-	-	-
37	8	25	14	9	12	26	-	-	-	-
38	8	25	10	9	12	12	-	-	-	-

39	7	11	14	10	14	-	-	-	-	-
40	9	25	12	18	-	-	-	-	-	-
41	10	12	-	-	-	-	-	-	--	-
42	6	10	-	-	-	-	-	-	-	-
43	7	12	-	-	-	-	-	-	-	--
44	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-
45	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-
46	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-
47	-	14	-	-	-	-	-	-	-	-
48	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-
49	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-
50	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-
51	-	13	-	-	-	-	-	.	-	-
52	-	12	-	-	-	-	-	.	-	-
53	-	15	-	-	-	-	-	.	-	-
54	-	15	-	-	-	-	-	.	-	-
55	-	12	-	-	-	-	-	.	-	-
56	-	16	-	-	-	-	-	.	-	--
57	-	12	-	-	-	-	-	.	-	-
58	-	16	-	-	-	-	-	.	-	-
59	-	14	-	-	-	-	-	.	-	-
60	-	9	-	-	-	-	-	.	-	-
61	-	13	-	-	-	-	-	.	-	-
62	-	14	-	-	-	-	-	.	-	-
63	-	14	-	-	-	-	-	.	-	-
64	-	9	-	-	-	-	-	.	-	--
65	-	17	-	-	-	-	-	.	-	-
66	-	27	-	-	-	-	-	.	-	-
67	-	15	-	-	-	-	-	.	-	-
68	-	8	-	-	-	-	-	.	-	-
69	-	16	-	-	-	-	-	.	-	-
70	-	11	--	-	-	-	-	.	-	-
71	-	14	-	-	-	-	-	.	-	-
72	-	10	-	-	-	-	-	.	-	-
73	-	9	-	-	-	-	-	.	-	-
74	-	12	-	-	-	-	-	.	-	-
75	-	15	-	-	-	-	-	.	-	-
76	-	13	-	-	-	-	-	.	-	-
77	-	16	-	-	-	-	-	.	-	-
78	-	13	-	-	-	-	-	.	-	-
Total	8,9	12,7	14,0	11,5	14,8	13,9	5,2	7,2	11,0	9,2

3A. Delimitación de las áreas bajo estudio de la primera etapa de la investigación.
Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.



4A. Delimitación y distribución de puntos de muestreo en el Área de Estudio (AE) de la segunda etapa de la investigación. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.



5A. Determinación de la variable Resistencia Mecánica a la Penetración del Suelo (RMPS). Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.



6A. Muestreo de suelo en diferentes profundidades para la determinación de las variables Densidad aparente, porosidad total, humedad y textura del suelo. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.



7A. Determinación de la variable velocidad de infiltración del agua en el suelo. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.



8A. Determinación de la variable rendimiento de granos de maíz. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

