

**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA COMPACTACIÓN DEL
SUELO PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN DE UN CULTIVO DE ARROZ EN
MONTERÍA, CORDOBA**

CAMILA ANDREA HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

ALEXIS ENRIQUE MELÉNDEZ CANO

JOAN SEBASTIÁN MONTERO FIALLO

ANDRÉS FELIPE PÉREZ RANGEL

ADOLFO JOSÉ NÚÑEZ POLO

**Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Especialista en Sistemas de información geográfica**

Línea de Investigación

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, Febrero 19 de 2025

Resumen

El trabajo se realizó en un lote mecanizado de arroz (*Oryza Sativa* L) en el corregimiento Santa Isabel, Montería – Córdoba. Durante los últimos 10 años, los informes anuales indicaron fluctuaciones en los rendimientos, relacionadas con la variabilidad del suelo en diferentes zonas del lote. El uso intensivo de maquinaria agrícola y las condiciones de suelo inundado contribuyeron a la compactación del terreno, especialmente en áreas con texturas diversas. Esto generó la necesidad de evaluar la compactación en varias partes del lote para entender su impacto en la penetración de las raíces y los valores heterogéneos de producción.

El objetivo principal fue analizar la variabilidad espacial de la compactación del suelo para optimizar la producción arrocera. La metodología incluyó el uso de datos de campo antes de la siembra, utilizando un penetrómetro para medir la resistencia del suelo, cuyos resultados se analizaron mediante interpolaciones IDW en el software QGIS, correlacionando compactación y rendimiento del cultivo.

Como resultados, se identificaron niveles de compactación que servirán como referencia para decisiones sobre mecanización de suelos. Esto busca reducir costos operativos, promover prácticas agrícolas sostenibles y mejorar la productividad del cultivo, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola en la región.

Palabras clave: Penetrómetro - Variabilidad espacial - Compactación - Mecanización agrícola - Compactación del suelo - IDW.

Abstract

The work was carried out in a mechanized rice (*Oryza Sativa* L) plot in Santa Isabel, Montería - Córdoba. During the last 10 years, annual reports indicated fluctuations in yields, related to soil variability in different areas of the field. The intensive use of agricultural machinery and flooded soil conditions contributed to soil compaction, especially in areas with different textures. This generated the need to evaluate compaction in various parts of the lot to understand its impact on root penetration and heterogeneous yield values.

The main objective was to analyze the spatial variability of soil penetration resistance to optimize rice production. The methodology included the use of field data prior to planting, using a penetrometer to measure soil resistance, the results of which were analyzed by IDW interpolations in QGIS software, correlating compaction and crop yield.

As a result, compaction levels were identified that will serve as a reference for decisions on soil mechanization. This aims to reduce operating costs, promote sustainable agricultural practices and improve crop productivity, contributing to agricultural sustainability in the region.

Keywords: Penetrometer - Spatial variability - Penetration resistance - Agricultural mechanization - Soil compaction - IDW.

Contenido

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN	8
1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA.....	8
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	10
1.3 JUSTIFICACIÓN	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. ANTECEDENTES	14
4. REFERENTE TEÓRICO	16
4.1.1 <i>Origen.....</i>	<i>18</i>
4.1.2 <i>Morfología y Taxonomía.....</i>	<i>18</i>
4.1.3 <i>Factores que influyen en el rendimiento del cultivo de arroz.....</i>	<i>25</i>
4.2 RECOLECCIÓN DE DATOS	26
4.2.1 <i>Instrumentos y técnicas de recolección de datos.....</i>	<i>26</i>
4.2.2 <i>Recolección de datos.....</i>	<i>27</i>
4.2.3 <i>Regresión Lineal.....</i>	<i>27</i>
4.2.4 <i>Interpolación espacial, Distancia Ponderada Inversa (IDW).....</i>	<i>28</i>
4.2.5 <i>Interpolación espacial, Kriging ordinario.....</i>	<i>28</i>
5. METODOLOGÍA.....	29
5.1 ENFOQUE METODOLÓGICO.....	29
5.2 TIPO DE ESTUDIO.....	30
5.3 PROCEDIMIENTO	31
6. RESULTADOS	35
6.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DE VARIABILIDAD ESPACIAL Y PRODUCCIÓN.....	35
6.1.1 <i>Estadística de los datos georreferenciados.....</i>	<i>39</i>
6.2 REGRESIÓN LINEAL DE LOS DATOS DE PRODUCCIÓN Y COMPACTACIÓN.....	40
6.3 DETERMINACIÓN DE INTERPOLACIÓN ESPACIAL, IDW.....	41
6.4 DETERMINACIÓN DE INTERPOLACIÓN ESPACIAL, KRIGING.....	49
6.4.1 <i>Interpolación de los Datos de Producción.....</i>	<i>49</i>
6.4.2 <i>Interpolación Datos de Compactación.....</i>	<i>53</i>
6.5 PROPUESTAS TÉCNICAS PARA EL MANEJO PRODUCTIVO DEL CULTIVO DE ARROZ E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	56
6.5.1 <i>Comparación de resultados método de Kriging e IDW.....</i>	<i>56</i>
6.5.2 <i>Interpretación Espacial de la Producción.....</i>	<i>58</i>
6.5.3 <i>Interpretación agronómica de patrones espaciales.....</i>	<i>60</i>
6.5.4 <i>Planteamientos de Propuestas Técnicas de Manejo para la Optimización del Cultivo de Arroz.....</i>	<i>61</i>

V *Análisis de la variabilidad espacial a la resistencia de la penetración del suelo para mejorar la producción de un cultivo de arroz en un lote ubicado en Montería, Córdoba*

7. CONCLUSIONES	63
8. RECOMENDACIONES	67
9. REFERENCIAS	71

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Vista de la raíz de arroz, tomado de Facultad de Ciencias Agrarias, UNNE.</i>	19
Figura 2. <i>Vista del tallo, tomado de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNNE.</i>	20
Figura 3. <i>Vista de la hoja de la planta, tomado de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNNE.</i>	21
Figura 4. <i>Vista de la planta y de la flor del arroz. Tomado de UNAL, 2016.</i>	22
Figura 5. <i>Vista de la planta y de la inflorescencia del arroz. Tomado de UNAL, 2016.</i>	23
Figura 6. <i>Vista del grano de arroz. Tomado de UNAL, 2016.</i>	24
Figura 7. <i>Ciclo normal del cultivo de arroz. Tomado de UNAL, 2016.</i>	25
Figura 8. <i>Fases de la Metodología.</i>	31
Figura 9. <i>Localización del Lote Cultivo de Arroz en Montería, Córdoba.</i>	36
Figura 10. <i>Regresión lineal de los valores de rendimiento y compactación.</i>	40
Figura 11. <i>Distribución espacial de la compactación por el método de interpolación IDW...</i>	42
Figura 12. <i>Distribución espacial de la producción por el método de interpolación IDW.....</i>	45
Figura 13. <i>Distribución espacial de la producción mediante interpolación Kriging Ordinario</i>	51
Figura 14. <i>Distribución espacial de la compactación por el método de interpolación Kriging Ordinario</i>	54

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Rendimiento en 10 puntos de control del lote de arroz para los años 2022 y 2023 en (t/ha). 11	
Tabla 2. Datos de Compactación en Lote de Cultivo de Arroz en Montería, Córdoba.	37
Tabla 3. Estadística básica de los datos.	39
Tabla 4. Rangos Puntos de Muestreo, Resultado de Análisis Ráster – Reclasificar por Tabla de datos de compactación.	42
Tabla 5. Leyenda de datos de compactación de la interpolación IDW.	43
Tabla 6. Rangos Puntos de Muestreo, Resultado de Análisis Ráster – Reclasificar por Tabla. .	45
Tabla 7. Leyenda de datos de productividad de la interpolación IDW	46
Tabla 8. Parámetros de interpolación Kriging para la producción	49
Tabla 9. Leyenda de datos de productividad interpolación Kriging	52
Tabla 10. Distribución de productividad en interpolación Kriging	52
Tabla 11. Parámetros interpolación Kriging para la compactación	53
Tabla 12. Leyenda de datos de compactación interpolación Kriging.	55
Tabla 13. Distribución de compactación en interpolación Kriging	55
Tabla 14. Históricos de producción en el cultivo de arroz para los años 2022, 2023 y 2024.....	58

1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

1.1 Descripción del área problemática

El cultivo del arroz es fundamental para la seguridad alimentaria en el mundo, puesto que se constituye como la principal fuente de aporte calórico para aproximadamente la mitad de la población mundial (FAO, 2004).

Los estudios y reportes de cambios en la porosidad y compactación del suelo, en áreas productoras de arroz en Colombia son muy escasos. El suelo es un recurso natural dinámico, en el que suceden procesos pedogenéticos, estos cambios pueden ser influenciados por el hombre, debido a las actividades que desarrolla. Uno de los problemas de degradación que afecta gran parte de los suelos del mundo es la densificación y compactación, cuya causa principal es el uso intensivo entre otros de maquinaria agrícola, bajo condiciones no aptas para el laboreo del suelo (Kuncoro, Koga, Satta, & Muto, 2014).

La compactación de los suelos se ocasiona cuando se ejerce una fuerza sobre la superficie a tal punto que se produce una deformación en su estructura, una reducción de la porosidad, ocasionando un aumento de la densidad aparente. Dicho fenómeno afecta otras propiedades físicas como la conductividad hidráulica y la difusividad de los gases en el medio edáfico, esto afecta el normal desarrollo de las raíces de las plantas, disminuyendo la producción de los cultivos, además se generan condiciones anaeróbicas que contribuyen a la liberación de gases con efecto invernadero.

La compactación del suelo puede ser originada por procesos naturales geológicos como cambios abruptos en sedimentos fluviales, por procesos pedogenéticos como la iluviación de arcillas, o por efectos antrópicos como el uso intensivo de maquinaria agrícola (Schneider, Don, Henning Schmittmann y Seidel, 2017).

Según Bradford y Gupta (1986) y Pinzón y Amézquita (1991) se denomina compactación cuando se comprime una muestra de suelo al aplicar una fuerza externa, deformando su estructura y ocasionando una expulsión de aire, si esta compresión ocurre en una muestra saturada y la expulsión es de agua se le llama consolidación (como se citó en Valdés, Gonzales y Will, 2011).

La compactación es un problema invisible, acumulativo y persistente, pero también puede considerarse como una degradación reversible, previsible y controlable, debido a la importancia de esta forma de degradación del suelo y la afectación del rendimiento de los cultivos, se requiere un diagnóstico para conocer el grado de compactación que presentan los suelos dedicados a una actividad agrícola intensiva (Gutiérrez, 2018).

La capacidad de las raíces para penetrar el suelo disminuye al aumentar la resistencia mecánica a la penetración. La compactación es importante en la relación suelo, agua y planta, debido a que esta propiedad determina el tamaño, elongación, tasas de crecimiento de la planta, limitando la capacidad de que las raíces exploren horizontes más profundos en busca de las reservas de agua en el suelo o requieran un mayor costo metabólico para llegar a estas.

La compactación de las raíces tiene un impacto significativo en la producción del cultivo de arroz. Cuando el suelo está demasiado compactado, se dificulta la penetración de las raíces, lo que puede limitar su crecimiento y acceso a nutrientes y agua (Ortiz y otros, 2011).

En general, un lote de arroz con problemas de compactación presenta problemas de limitación de las raíces, reducción de la porosidad del suelo, disminución de la eficiencia en el uso de fertilizantes y estrés en las plantas (Gutiérrez, 2018). Como consecuencia es importante gestionar la compactación del suelo para asegurar que las raíces del arroz puedan desarrollarse adecuadamente y acceder a los recursos que necesitan para una producción óptima (Ortiz y otros, 2011).

1.2 Formulación del problema

El Centro Agropecuario de Biotecnología El Porvenir del Servicio Nacional de Aprendizaje, SENA, Regional Córdoba, Tiene establecidas 11 hectáreas para la producción del cultivo de arroz bajo condiciones de riego por inundación. Los informes de producción anuales indican que en los últimos 10 años han fluctuado los valores de rendimiento de acuerdo con datos de diferentes zonas del lote tomados repetidamente a lo largo del tiempo, de manera consecutiva en el mismo sitio.

Es así como el rendimiento en 10 puntos del lote para los años 2022 y 2023 se muestran en la **Tabla 2** en toneladas por hectárea. El uso intensivo de maquinaria agrícola y las condiciones de suelo inundado han hecho posible que el suelo se compacte, más aún cuando la textura del suelo es diversa en el lote.

Tabla 1. Rendimiento en 10 puntos de control del lote de arroz para los años 2022 y 2023 en (t/ha).

PUNTO	2022	2023
1	5.3	5.5
2	4.9	4.8
3	6.1	6
4	4	4.1
5	5.9	5.7
6	5	4.6
7	5.5	5.5
8	4.4	4.5
9	5.7	5.9
10	4.6	4.8

Existe la necesidad de conocer los valores de compactación que se presentan en varias partes del lote para determinar la compactación de las raíces de las plantas de arroz que ocasionan los valores heterogéneos de producción del lote. Ante lo anteriormente expuesto surge la necesidad de responder al siguiente cuestionamiento: ¿Cuáles son las estrategias para la homogenización de la producción que se pueden generar a partir del análisis de variabilidad espacial de la compactación del suelo en un cultivo de arroz de un lote ubicado en Montería, Córdoba?

1.3 Justificación

El vigente Plan de Desarrollo Departamental de Córdoba 2024-2027 “Córdoba lo tiene todo para estar a otro nivel” (Gobernación de Córdoba, 2024) indica que el cultivo arroz (*Oryza Sativa L*) forma parte de su apuesta productiva y que su sistema de producción de arroz riego presenta en la variable área una marcada tendencia a la baja durante el periodo analizado. Se observa que al final del periodo es cuando se presenta la mayor baja del área cultivada. A pesar

de que los rendimientos son buenos debido a los altos costos de producción no hay incentivos para producir. Igualmente, los precios de venta son muy bajos y apenas cubren los costos unitarios de producción sin poca posibilidad de generar un remanente de ganancia.

El costo de producir una tonelada de arroz es de \$ 7.052.291 (Fedearroz, S.F) y el precio de venta es de \$1.350.000 para la zona, tomando como referencia el arroz paddy verde/tonelada (Fedearroz, S.F) con una productividad promedio para la zona de Córdoba de 5,5 (t/ha), con un remanente muy bajo de ganancia del 5.3%, lo cual es poco estimulante para el productor. El sistema de cultivo de arroz bajo inundación requiere ser estudiado para identificar las determinantes.

La compactación es un problema invisible, acumulativo y persistente (Horn, Domzal, Jurkiewicz y Ouwerkerk, 1995; Barik, Aksakal, Islam, Sari y Angin, 2014), pero también puede considerarse como una degradación reversible, previsible y controlable (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación [FAO], 2004), de acuerdo con lo anterior, la degradación del suelo ha de incidir sobre la producción de los cultivos y se requiere un estudio que permita conocer las estrategias para la homogenización de la producción del arroz bajo condiciones de riego que se puedan generar a partir del análisis de variabilidad espacial de los datos de la compactación del suelo en la finca El Porvenir, localizada en Montería, Córdoba.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar la variabilidad espacial a la resistencia de la penetración del suelo para mejorar la producción de un cultivo de arroz en un lote ubicado en Montería, Córdoba.

2.2 Objetivos específicos

1. Identificar el componente de la variabilidad espacial para el análisis de la compactación del suelo y de la producción en un cultivo de arroz.
2. Determinar y comparar las interpolaciones IDW y Kriging, utilizando el componente de variabilidad espacial para analizar tanto la compactación del suelo como la producción en un cultivo de arroz.
3. Plantear propuestas de manejo técnico de acuerdo con los resultados de la variabilidad de la compactación del suelo y producción en un cultivo de arroz para su manejo productivo.

3. Antecedentes

Gutiérrez (2018) realizó un estudio en suelos destinados a la producción de arroz en el municipio de Campoalegre, Huila, donde determinó que los valores de porosidad permiten clasificar dichos suelos como moderadamente porosos a porosos. Asimismo, encontró que presentan una conductividad hidráulica media y niveles de compactación inferiores a 2 MPa, condiciones que no limitan el desarrollo radicular del arroz. Su análisis evidenció que, hasta una profundidad de 20 cm, estos suelos no presentan compactación significativa, lo que sugiere un ambiente favorable para el crecimiento del cultivo.

Por otro lado, el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), en convenio con FEDEARROZ (2022), identificó diferencias significativas en la producción de arroz en relación con los niveles de compactación del suelo. Utilizando la plataforma VERIS para la toma de datos, los investigadores encontraron que la compactación de las raíces tiene un impacto directo en el rendimiento del cultivo, resaltando la importancia del monitoreo de la estructura del suelo para optimizar la productividad.

Munyati & Sinthumule (2021) realizaron un estudio comparativo entre los métodos de interpolación Kriging Ordinario e IDW (Inverse Distance Weighting) para evaluar los cambios en la cobertura vegetal en una zona de transición entre sabana y bosque. Su investigación evidenció que IDW es más adecuado en entornos con alta variabilidad espacial, ya que permite identificar con mayor precisión gradientes de cambio y patrones específicos dentro del paisaje. En contraste, Kriging tiende a suavizar las transiciones espaciales, lo que puede ocultar variaciones críticas en áreas con cambios abruptos en la cobertura. Los hallazgos de este estudio son relevantes, ya que

la elección del método IDW se basa en su capacidad para representar con mayor precisión las variaciones locales, evitando el efecto de suavizado característico de Kriging.

4. Referente teórico

En 2023, en Colombia se sembraron 589.853 hectáreas de arroz mecanizado, con un costo de producción de una tonelada de arroz estimado en \$7.052.291 (Fedearroz, s.f.). Para el primer semestre de 2024, la superficie sembrada de arroz mecanizado ascendió a 452.872 hectáreas, lo que representa un incremento del 9,5 % en comparación con el mismo periodo de 2023, cuando se sembraron 413.644 hectáreas (DANE, 2024). Sin embargo, la producción de arroz enfrenta desafíos debido a la disminución de los precios que la industria molinera paga a los productores, generando preocupación entre los cultivadores (Infobae, 2024).

La compactación es un proceso que reduce el espacio poroso en el suelo debido a la aplicación de una fuerza externa, lo que degrada su estructura. Este fenómeno, ocasionado generalmente por prácticas de labranza convencional y el uso intensivo de maquinaria pesada, produce un adensamiento que limita el desarrollo de las raíces de las plantas. No obstante, este tipo de degradación puede ser reversible y controlable con prácticas de manejo adecuadas (FAO, 2018; Corteva, 2024).

La compactación del suelo también reduce la circulación de gases, lo que genera efectos anaeróbicos como la liberación de óxido nitroso (N_2O) y otros gases de efecto invernadero. Ball, Parker y Scott (1999) observaron que la compactación del suelo bajo cultivos de cebada en Escocia incrementó significativamente las emisiones de este gas. Estudios recientes han evidenciado que, en suelos compactados cultivados con maíz, las emisiones de N_2O pueden aumentar considerablemente (Medios UNNE, 2022).

La compactación del suelo se puede medir con un penetrómetro, un instrumento que cuantifica la resistencia mecánica del suelo a la penetración mediante unidades de presión (kPa). Se define como el esfuerzo uniforme equivalente proyectado sobre la superficie del cono que equilibra la carga vertical aplicada sobre él. También se describe como la fuerza requerida para presionar un cono de 30° en el suelo (Abedin & Hettiaratchi, 2002; ASABE, 2006; Tenza, 2016).

La capacidad de penetración de las raíces disminuye a medida que aumenta la resistencia mecánica del suelo. Se considera que valores superiores a 2 MPa constituyen un límite para el crecimiento radicular (Soane et al., 1981; Veronese et al., 2006; Otto et al., 2011; Cortes, Camacho & Leiva, 2013), y a partir de 2,5 MPa, la penetración de las raíces cesa completamente (Pabin et al., 1998; Hamza & Anderson, 2005; Kruger et al., 2008).

La compactación del suelo influye en la relación suelo-agua-planta, determinando el tamaño, la elongación y las tasas de crecimiento de las plantas. Esta condición restringe la capacidad de las raíces para explorar horizontes más profundos en busca de agua, lo que implica un mayor costo metabólico para la planta (Atwell, 1990; Bengough et al., 2011; Grzesiak et al., 2014; Colombi et al., 2017; Colombi et al., 2018; Marroquín, 2018).

En suelos donde el uso de maquinaria agrícola ha sido intensivo durante varios años, puede generarse una capa subsuperficial compactada denominada "suela de labor" o "pie de arado". Esta capa, de mayor densidad que la superficie, dificulta el crecimiento radicular y la infiltración de agua (White & Kierkegaard, 2010; Lynch & Wojciechowski, 2015; Colombi et al., 2018).

Implementar prácticas agrícolas sostenibles, como el uso de maquinaria adecuada, la rotación de cultivos y técnicas de labranza conservacionista, es fundamental para minimizar la compactación del suelo y garantizar una producción agrícola eficiente (Corteva, 2024).

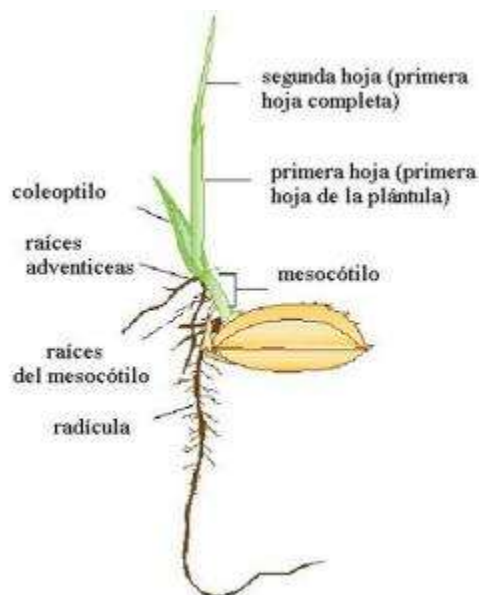
4.1.1 Origen

El arroz (*Oryza sativa*) es una monocotiledónea perteneciente a la familia Poaceae. El cultivo del arroz comenzó hace casi 10.000 años, en muchas regiones húmedas de Asia tropical y subtropical. Posiblemente sea la India el país donde se cultivó por primera vez el arroz debido a que en ella abundaban los arroces silvestres. Pero el desarrollo del cultivo tuvo lugar en China, desde sus tierras bajas a sus tierras altas. Probablemente hubo varias rutas por las cuales se introdujeron los arroces de Asia a otras partes del mundo. (Muñoz, 2016).

4.1.2 Morfología y Taxonomía.

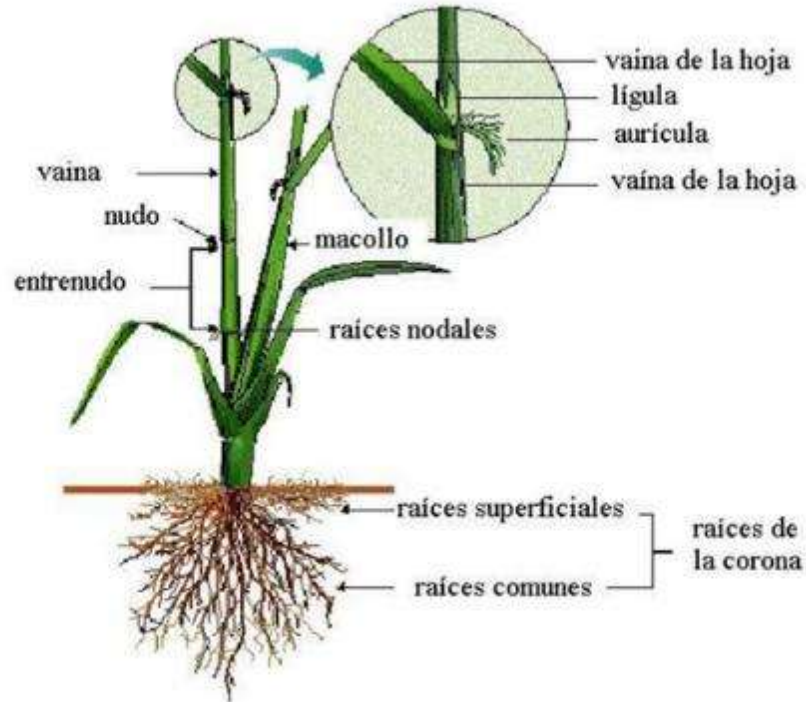
El cultivo de arroz presenta una estructura morfológica bien definida, que comienza con las raíces (**Figura 1**), las cuales son delgadas, fibrosas y fasciculadas. En este sentido, el arroz posee dos tipos de raíces: las seminales, originadas de la radícula, que tienen una vida temporal, y las adventicias secundarias, que se desarrollan a partir de los nudos inferiores del tallo joven, ramificándose libremente y sustituyendo a las raíces seminales. Este sistema radicular es esencial para el desarrollo del cultivo, ya que permite la absorción de agua y nutrientes necesarios para su crecimiento. (Muñoz, 2016).

Figura 1. *Vista de la raíz de arroz, tomado de Facultad de Ciencias Agrarias, UNNE.*



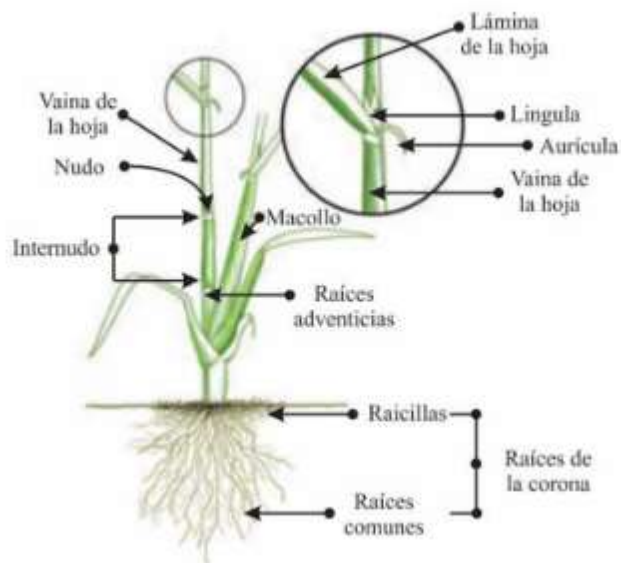
El tallo del arroz (**Figura 2**), que es cilíndrico, nudoso y glabro, tiene entre 60 y 120 cm de longitud. Su formación se compone de nudos y entrenudos alternados, y su estructura robusta permite que la planta sostenga las hojas y flores. Esta característica es fundamental para el crecimiento vertical y la estabilidad de la planta durante su desarrollo. (Muñoz, 2016).

Figura 2. Vista del tallo, tomado de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNNE.



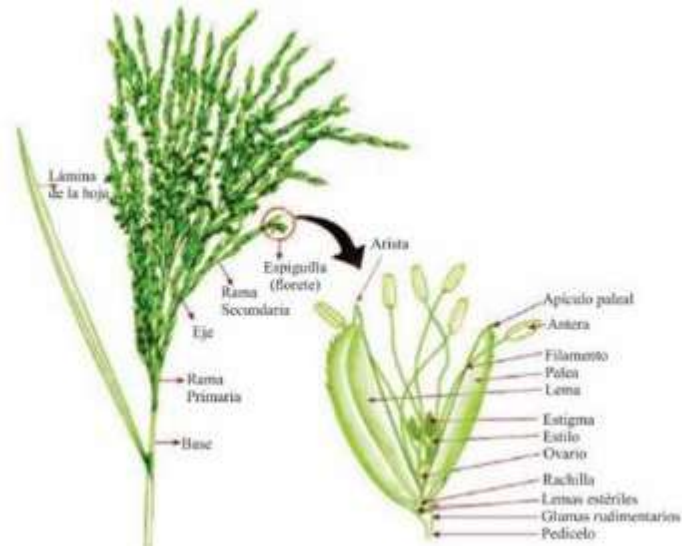
Las hojas del arroz son alternas y envainadoras (**Figura 3**), con un limbo lineal, agudo, largo y plano. En el punto de unión entre la vaina y el limbo se observa una lígula membranosa, bífida y erguida, que presenta cirros largos y sedosos en el borde inferior. Estas hojas juegan un papel clave en la fotosíntesis, proporcionando energía para la planta. (Muñoz, 2016)

Figura 3. Vista de la hoja de la planta, tomado de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNNE.



Las flores del arroz son de color verde blanquecino y se agrupan en espiguillas (**Figura 4**). Estas espiguillas forman una panoja grande, terminal, estrecha y colgante después de la floración. Las flores son esenciales para la formación de los granos, que se desarrollan durante el ciclo de crecimiento del cultivo. (Muñoz, 2016).

Figura 4. Vista de la planta y de la flor del arroz. Tomado de UNAL ,2016.



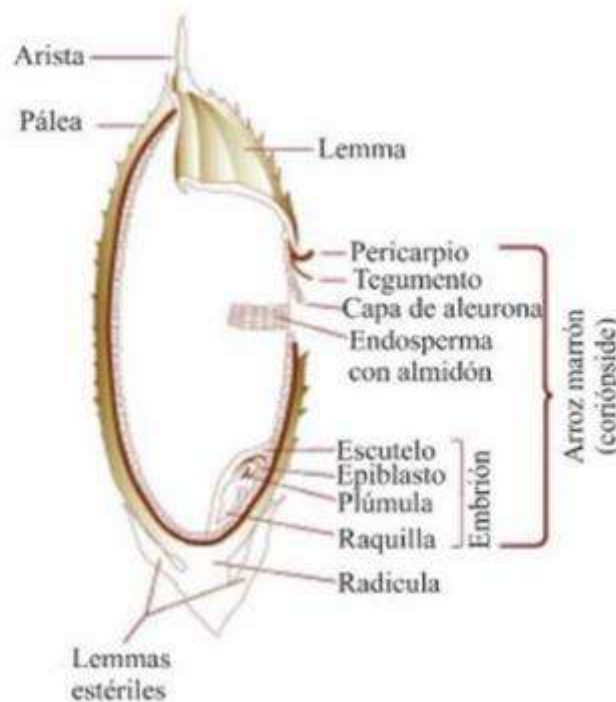
La inflorescencia del arroz se presenta en forma de una panícula determinada que se encuentra en el vástago terminal (**Figura 5**). La espiguilla, unidad de la panícula, está compuesta por dos lemmas estériles, la raquilla y el flósculo, estructuras que facilitan la reproducción de la planta. (Muñoz, 2016).

Figura 5. *Vista de la planta y de la inflorescencia del arroz. Tomado de UNAL, 2016.*



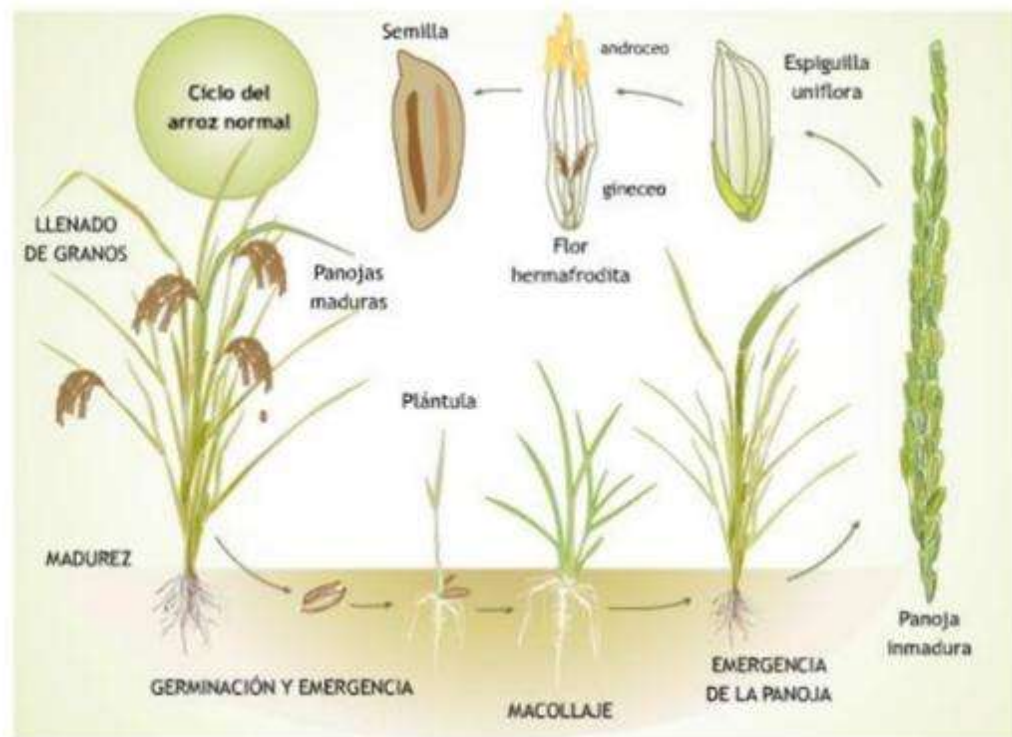
Finalmente, el grano de arroz es el ovario maduro, que una vez descascarado, muestra diferentes colores (**Figura 6**). El grano con pericarpio pardusco se conoce como arroz café, mientras que el grano sin cáscara y con pericarpio rojo recibe el nombre de arroz rojo. Estos granos son la base de la producción comercial del arroz. (Muñoz, 2016).

Figura 6. Vista del grano de arroz. Tomado de UNAL, 2016.



Por último, el ciclo normal del cultivo de arroz, como se observa en la imagen, comprende varias etapas fundamentales (**Figura 7**). El proceso inicia con la germinación y emergencia, donde la semilla brota y desarrolla su plántula inicial. Luego pasa a la fase de macollaje, donde la planta desarrolla nuevos brotes y fortalece su sistema radicular. Posteriormente, ocurre la emergencia de la panoja, seguida por el desarrollo de la panoja inmadura que contiene las espiguillas unifloras. En estas espiguillas se encuentran las flores hermafroditas, compuestas por el androceo y gineceo. Finalmente, el ciclo culmina con la etapa de madurez, caracterizada por el llenado de granos y las panojas maduras que contienen las semillas listas para cosecha (Muñoz, 2016).

Figura 7. *Ciclo normal del cultivo de arroz. Tomado de UNAL, 2016*



4.1.3 Factores que influyen en el rendimiento del cultivo de arroz.

La compactación es un factor físico importante que influye en la disminución de los rendimientos en el cultivo del arroz, igualmente existen otros factores limitantes que influyen o determinan la producción del cultivo como los factores climáticos tales como la temperatura, la radiación solar y el viento los cuales tienen influencia sobre el rendimiento del cultivo ya que afectan el crecimiento de la planta y los procesos fisiológicos relacionados con la formación del grano. Estos factores también afectan indirectamente el rendimiento aumentando el daño causado por las plagas y las enfermedades. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación - FAO, 2003).

Para el caso de la temperatura, las altas y bajas temperaturas por encima y por debajo de los límites críticos afectan el rendimiento de grano ya que inciden sobre el macollaje, la formación de espiguillas y la maduración. Las bajas temperaturas limitan la duración del período y la tasa de crecimiento y el desarrollo de las plantas de arroz. Las altas temperaturas causan estrés térmico sobre las plantas de arroz. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación - FAO, 2003).

4.2 Recolección de datos

4.2.1 Instrumentos y técnicas de recolección de datos

Siguiendo a Hernández Sampieri et al. (2014), "la recolección de datos implica elaborar un plan detallado de procedimientos que nos conduzcan a reunir datos con un propósito específico" (p. 198). Se implementaron:

1. Instrumentos de medición calibrados.
2. Formatos de registro estandarizados.
3. Sistema de georreferenciación.

La investigación se basa en datos secundarios obtenidos de un estudio previo realizado en un lote de arroz, ubicado en Montería Córdoba. Estos datos comprenden:

1. Mediciones de compactación del suelo mediante penetrómetro tipo cono y recolección de datos para análisis de productividad del cultivo de arroz.
2. Datos geoespaciales con la georreferenciación de los puntos de medición.

3. Registros de las características físicas del suelo.

4.2.2 Recolección de datos

Para realizar la toma de información se procedió de la siguiente manera:

1. Toma de patrones de muestreo en grilla de 40 metros aproximadamente
2. Mediciones de compactación
3. Toma de información para análisis de productividad en los puntos de muestreo. Para la cosecha del cultivo se tiene en cuenta el grado de madurez y el contenido de humedad del grano, los cuales son los factores más determinantes en la cosecha del cultivo de arroz. Es necesario saber que el momento óptimo de la cosecha del arroz se determina cuando alcanza su madurez fisiológica. El rango de humedad del grano óptimo para la cosecha de arroz paddy verde es de 22 a 25 %. (FADQDI, 2018).
4. Registro de coordenadas geográficas.

4.2.3 Regresión Lineal

La regresión lineal es una técnica estadística ampliamente utilizada que permite modelar y analizar la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes.

La regresión lineal permite identificar y cuantificar la relación entre variables, lo que resulta fundamental para la toma de decisiones informadas en una amplia variedad de situaciones. Al comprender cómo se relacionan las variables, podemos predecir y estimar valores futuros, evaluar el impacto de los cambios en las variables independientes y analizar la significancia de las relaciones observadas.

La regresión lineal se basa en varios supuestos fundamentales. Estos nos permiten obtener estimaciones precisas y confiables a partir de los datos. Algunos de los supuestos clave incluyen la linealidad de la relación entre las variables, la independencia de los errores y la ausencia de multicolinealidad. Es importante tener en cuenta estos supuestos al realizar un análisis de regresión lineal, ya que su violación puede afectar la validez de los resultados y las conclusiones que se puedan extraer. (Universidad de los Andes, 2023)

4.2.4 Interpolación espacial, Distancia Ponderada Inversa (IDW)

La interpolación espacial se refiere a estimar los valores de una variable objetivo en una ubicación no muestreada con base en medidas cercanas conocidas (Krivoruchko y Gotway, 2003).

El método de interpolación IDW genera una superficie ráster a partir de una serie de puntos utilizando la técnica de distancia ponderada. Esta técnica determina el valor de las celdas con base a la distancia lineal ponderada de una combinación de un conjunto de puntos de muestra (Esri, 2023).

La importancia en la precisión de los datos es importante para todo tipo de análisis, puesto que, si no es lo suficientemente precisa, los resultados de interpolación no tendrán mucho sentido. Para obtener la superficie deseada, los puntos de entrada no deben ser muy dispersos, es decir, que sea lo suficientemente densa (Philip & Watson, 1985).

4.2.5 Interpolación espacial, Kriging ordinario

Es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto disperso de puntos con valores z . A diferencia de otros métodos de interpolación del conjunto de herramientas Interpolación, el uso eficaz de la herramienta Kriging implica una investigación interactiva del comportamiento espacial del fenómeno representado por los valores z antes de seleccionar el mejor método de estimación para generar la superficie de salida.

Kriging supone que la distancia o dirección entre los puntos de muestreo refleja una correlación espacial que se puede utilizar para explicar la variación en la superficie. La herramienta Kriging ajusta una función matemática a un número especificado de puntos, o a todos los puntos dentro de un radio especificado, para determinar el valor de salida para cada ubicación. El Kriging es un proceso de varios pasos; Incluye el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variograma, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de una superficie de varianza. El Kriging es más apropiado cuando se sabe que hay una distancia correlacionada espacialmente o un sesgo direccional en los datos. A menudo se utiliza en la ciencia del suelo y la geología. (Esri, 2023).

5. Metodología

5.1 Enfoque metodológico

Basado en el diseño de investigación planteado por Creswell (2009), este trabajo adopta un enfoque mixto mediante una estrategia secuencial que integra métodos cualitativos y

cuantitativos. Este enfoque es adecuado dado que el estudio sobre la variabilidad espacial de la compactación del suelo en cultivos de arroz requiere un análisis cuantitativo para medir y analizar datos espaciales, así como un análisis cualitativo para interpretar los resultados desde una perspectiva agronómica (Hernández Sampieri et al., 2014).

Para lograr una integración efectiva de los datos, se utilizaron herramientas como mapas temáticos, tablas y software especializado QGIS. Estas representaciones, que se alinean con el concepto de joint displays descrito por Fetters y Tajima (2022), permitieron combinar información cuantitativa y cualitativa en formatos visuales claros. Los mapas reflejaron la distribución espacial de la resistencia del suelo, mientras que las tablas complementaron este análisis con descripciones cualitativas que ayudaron a contextualizar los patrones identificados. Este enfoque enriqueció la interpretación de los resultados, promoviendo una integración robusta entre las fases cualitativa y cuantitativa.

5.2 Tipo de estudio

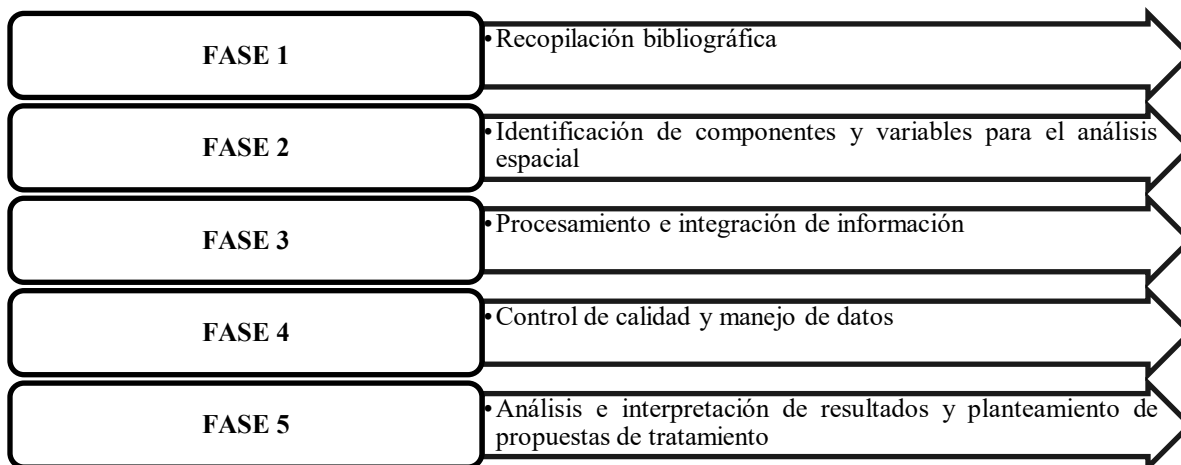
El presente trabajo es de tipo exploratorio-descriptivo, ya que busca identificar patrones y correlaciones entre la variabilidad de la resistencia del suelo y la producción de arroz, integrando enfoques cualitativos y cuantitativos.

La fase cualitativa se centra en la revisión de literatura y estudios previos para contextualizar el fenómeno, mientras que la fase cuantitativa aborda la medición y análisis de datos geoespaciales. Estos datos permiten generar mapas temáticos que describen la distribución espacial de la resistencia del suelo y posteriormente analizar su influencia en la productividad agrícola.

5.3 Procedimiento

Se llevó a cabo una investigación aplicada utilizando software libre como QGIS y en cinco fases, como se observa en la **Figura 8**.

Figura 8. *Fases de la Metodología.*



El objetivo principal de este procedimiento es contribuir al conocimiento en el ámbito de la agronomía, proporcionando una metodología práctica que ayude a los agricultores a optimizar la sostenibilidad y productividad del cultivo de arroz.

Fase 1: Recopilación bibliográfica

En esta primera etapa, se realizó un análisis cualitativo que incluye la revisión y análisis de textos y estudios previos relacionados con casos de variabilidad espacial de la compactación del suelo en los cultivos de arroz y su impacto en la producción. Este análisis permitió identificar conceptos clave, teorías relevantes y antecedentes sobre la producción de arroz bajo diferentes condiciones. La información recopilada contextualiza el fenómeno y ayudó a identificar variables que pueden influir tanto en la resistencia del suelo como en la productividad o rendimiento del cultivo.

Fase 2: Identificación de componentes y variables para el análisis espacial

En esta fase se identificaron y definieron las variables principales necesarias para el análisis espacial, tales como la compactación del suelo teniendo en cuenta la medida de compactación y el rendimiento de la producción. Además, se determinaron las herramientas metodológicas más adecuadas, priorizando el uso de software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para analizar y representar dichas variables.

Fase 3: Procesamiento e integración de información

En esta etapa se realizará el procesamiento de los datos obtenidos y se generará información geoespacial. El análisis de los datos permitirá identificar patrones y correlaciones entre la resistencia del suelo y la productividad del cultivo de arroz. Se elaborarán mapas temáticos que reflejen áreas con diferentes niveles de resistencia del suelo y su impacto en la producción. Esta fase incluye la integración de enfoques cualitativos y cuantitativos, fortaleciendo la validez de los resultados y ofreciendo una perspectiva más completa sobre cómo la variabilidad del suelo afecta la producción agrícola.

Fase 4: Control de calidad y manejo de datos

Para garantizar la calidad y la consistencia de los datos secundarios utilizados, se implementarán los siguientes pasos:

- Verificación de la calibración del penetrómetro digital utilizado en las mediciones originales.
- Validación de la cuadrícula con celdas de 1 metro por 1 metro para asegurar una cobertura adecuada del área de estudio.

- Comprobación de la correspondencia entre puntos georreferenciados y mediciones realizadas en campo.
- Organización de los datos en hojas de cálculo estructuradas para facilitar su análisis posterior.

Fase 5: Análisis e interpretación de resultados y planteamiento de propuestas de tratamiento

El análisis de los datos se llevará a cabo mediante un enfoque de métodos mixtos, estructurado en tres subfases:

1. Análisis de variabilidad espacial
 - Procesamiento estadístico descriptivo de las mediciones de resistencia del suelo y productividad.
 - Exploración de datos espaciales para identificar patrones significativos.
 - Reconocimiento de áreas críticas en el terreno con alta variabilidad.
2. Análisis de interpolación
 - Aplicación del método IDW (Inverse Distance Weighted) para generar mapas de variabilidad espacial.
 - Aplicación del método Kriging para generar mapa de variabilidad espacial.
 - Elaboración de mapas temáticos que muestren las zonas críticas y su impacto en la producción agrícola.
3. Análisis técnico
 - Interpretación de los patrones espaciales identificados.
 - Desarrollo de propuestas de manejo adaptadas a las características del terreno estudiado.

En esta fase se emplearon los siguientes instrumentos para la recolección de información:

Revisión de literatura: Se analizaron textos y estudios previos sobre variabilidad espacial en cultivos de arroz.

- Datos geoespaciales: Obtenidos mediante un penetrómetro digital, con mediciones realizadas en puntos georreferenciados durante actividades en el centro de estudios del SENA.
- Software SIG: Herramienta esencial para el análisis y representación de datos espaciales.

Las técnicas y métodos de análisis aplicados fueron:

- Análisis cualitativo de textos.
- Análisis estadístico descriptivo.
- Análisis comparativo.

Adicionalmente, se tomaron precauciones metodológicas al trabajar con datos secundarios, verificando la metodología de recolección original y documentando cualquier limitación inherente a estos datos.

6. Resultados

6.1 Identificación de los componentes de variabilidad espacial y producción

Los datos de campo fueron tomados en forma de malla a 40 metros aproximadamente entre cada punto, utilizando un penetrómetro tipo cono y georreferenciada con GNSS submétrico, obteniendo valores de compactación del suelo en kPa, para un total de 69 muestras en un lote de 11,8 ha aproximadamente.

Para el análisis de datos de productividad la toma de muestras fue realizada en un marco de cuadrícula de tamaño de celda de $1\text{m} \times 1\text{m}$ para cubrir el área de estudio, según el “protocolo de evaluación del rendimiento real (kg/ha) para el cultivo de arroz”, (FADQDI, 2018), donde se muestrearon los mencionados puntos para evaluar el rendimiento o productividad en ton/ha.

Los datos de la compactación del suelo, compactación, en la columna COMPACTACIÓN (kPa) se muestran en la **Tabla 2**, los cuales fueron obtenidos a una profundidad máxima de 5cm, lo anterior debido a que la morfología de planta del arroz indica que la raíces se desarrollan hasta los 25cm. y los datos de producción en la columna RENDIMIENTO (ton/ha).

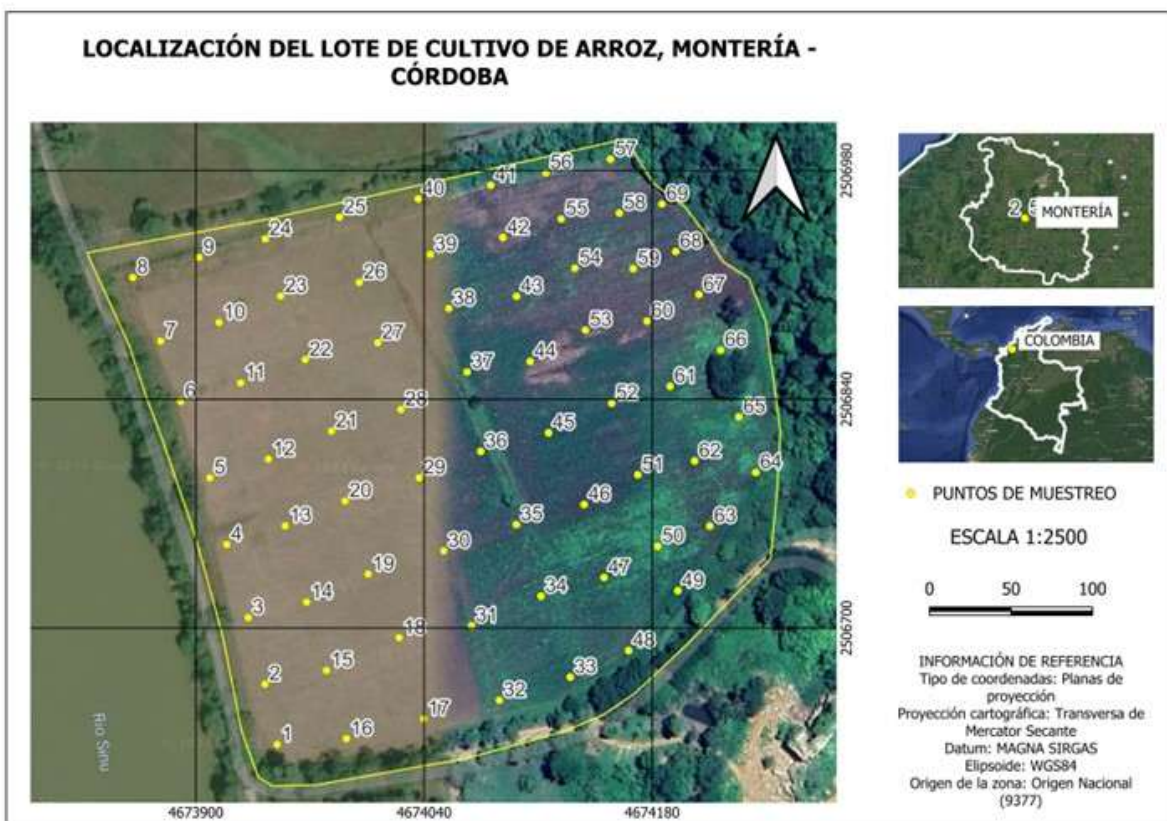
En las figuras del Anexo A, se muestran las características del predio del Centro Agropecuario y de Biotecnología El Porvenir, SENA, Regional Córdoba, tomadas por Alexis Meléndez (2024).

La **Figura 9** muestra la localización y presenta el recorrido del muestreo del lote de cultivo de arroz en Montería, Córdoba. Este mapa, generado a través del software QGIS, indica la ubicación exacta del lote dentro del área geográfica de Montería. La visualización facilita la

identificación del terreno estudiado y su contexto regional, proporcionando una base espacial para los análisis posteriores relacionados con la compactación y producción en el cultivo.

El recorrido incluye los puntos de muestreo clave donde se tomaron las mediciones de compactación y producción, permitiendo así una visualización clara de la distribución geográfica de las áreas muestreadas. Además, resalta la importancia de la localización precisa para interpretar los datos obtenidos durante el estudio.

Figura 9. Localización del Lote Cultivo de Arroz en Montería, Córdoba.



La **Tabla 2** presenta los datos de compactación en el lote de cultivo de arroz en Montería, Córdoba. En esta tabla se detallan las mediciones obtenidas a lo largo del terreno, proporcionando información sobre la variabilidad de la resistencia del suelo en diferentes puntos de muestreo. Estos datos son esenciales para evaluar la compactación del suelo, un factor crucial

para el desarrollo radicular del cultivo. A través de estos valores, se puede identificar la presencia de áreas con alta resistencia, que podrían limitar el crecimiento de las raíces, así como aquellas con condiciones más favorables para el cultivo.

Tabla 2. *Datos de Compactación en Lote de Cultivo de Arroz en Montería, Córdoba.*

PUNTOS	X	Y	COMPACTACIÓN (kPa)	RENDIMIENTO (Kg/m ²)	RENDIMIENTO (ton/ha)
1	4673950	2506629	20	0.735	7.35
2	4673942	2506666	35	0.711	7.11
3	4673932	2506706	120	0.692	6.92
4	4673919	2506751	200	0.648	6.48
5	4673909	2506792	225	0.641	6.41
6	4673891	2506839	40	0.714	7.14
7	4673878	2506876	40	0.718	7.18
8	4673861	2506915	30	0.701	7.01
9	4673902	2506927	50	0.703	7.03
10	4673914	2506887	55	0.703	7.03
11	4673927	2506850	65	0.705	7.05
12	4673944	2506803	250	0.651	6.51
13	4673955	2506763	215	0.649	6.49
14	4673968	2506716	80	0.708	7.08
15	4673980	2506674	30	0.701	7.01
16	4673992	2506632	40	0.722	7.22
17	4674040	2506644	150	0.674	6.74
18	4674025	2506694	160	0.668	6.68
19	4674006	2506733	225	0.645	6.45
20	4673992	2506778	415	0.572	5.72
21	4673983	2506820	420	0.565	5.65
22	4673967	2506864	155	0.671	6.71
23	4673952	2506903	140	0.681	6.81
24	4673943	2506938	130	0.688	6.88
25	4673988	2506951	185	0.679	6.79
26	4674000	2506912	170	0.665	6.65
27	4674012	2506875	220	0.642	6.42
28	4674026	2506834	435	0.542	5.42
29	4674037	2506792	430	0.546	5.46
30	4674052	2506747	40	0.731	7.31
31	4674069	2506701	200	0.649	6.49

PUNTOS	X	Y	COMPACTACIÓN (kPa)	RENDIMIENTO (Kg/m ²)	RENDIMIENTO (ton/ha)
32	4674086	2506656	230	0.639	6.39
33	4674130	2506670	280	0.662	6.62
34	4674112	2506720	205	0.649	6.49
35	4674097	2506763	240	0.645	6.45
36	4674075	2506808	300	0.655	6.55
37	4674066	2506857	420	0.561	5.61
38	4674055	2506896	390	0.604	6.04
39	4674044	2506929	405	0.576	5.76
40	4674036	2506963	320	0.648	6.48
41	4674081	2506971	325	0.632	6.32
42	4674088	2506939	340	0.641	6.41
43	4674097	2506903	460	0.535	5.35
44	4674105	2506863	290	0.665	6.65
45	4674116	2506819	300	0.653	6.53
46	4674138	2506776	470	0.529	5.29
47	4674150	2506731	450	0.542	5.42
48	4674166	2506686	320	0.646	6.46
49	4674196	2506723	350	0.635	6.35
50	4674183	2506750	460	0.533	5.33
51	4674171	2506794	480	0.521	5.21
52	4674155	2506838	320	0.644	6.44
53	4674139	2506882	455	0.531	5.31
54	4674133	2506920	445	0.539	5.39
55	4674124	2506950	260	0.653	6.53
56	4674115	2506979	295	0.661	6.61
57	4674154	2506987	305	0.651	6.51
58	4674160	2506954	290	0.665	6.65
59	4674168	2506920	470	0.528	5.28
60	4674177	2506888	375	0.612	6.12
61	4674191	2506848	430	0.545	5.45
62	4674206	2506802	290	0.667	6.67
63	4674215	2506762	305	0.653	6.53
64	4674244	2506795	345	0.639	6.39
65	4674233	2506829	425	0.553	5.53
66	4674222	2506870	445	0.539	5.39
67	4674209	2506904	340	0.64	6.4
68	4674194	2506930	390	0.602	6.02
69	4674186	2506960	400	0.592	5.92

Nota. Las coordenadas se encuentran proyectadas en MAGNA SIRGAS – ORIGEN NACIONAL

(9377)

6.1.1 Estadística de los datos georreferenciados.

A través del Software QGIS con la herramienta estadísticas básicas para campos se determina la información estadística de los datos georreferenciados, se puede evidenciar que existen del total de datos recolectados 50 valores son únicos, el valor mínimo es de 20 kPa y el máximo corresponde a 480 kPa. La mediana de los datos recolectados es de 290 kPa con un coeficiente de variación de 0.52 **Tabla 3.**

Tabla 3. *Estadística básica de los datos.*

Estadístico	Valores Resistencia la Penetración	Unidad	Valores Rendimiento	Unidad
Recuento	69	NA	69	NA
Valores únicos	50	NA	54	NA
Valor mínimo	20	kPa	5.21	ton/ha
Valor Máximo	480	kPa	7.35	ton/ha
Media	269.42	kPa	6.34	ton/ha
Mediana	290	kPa	6.48	ton/ha
Desviación estándar	140.69	kPa	0.59	ton/ha
Coefficiente de variación	0.52	NA	0.09	NA

Nota. Unidades No Aplica (NA), Kilo pascales (kPa), Toneladas/Hectárea (ton/ha)

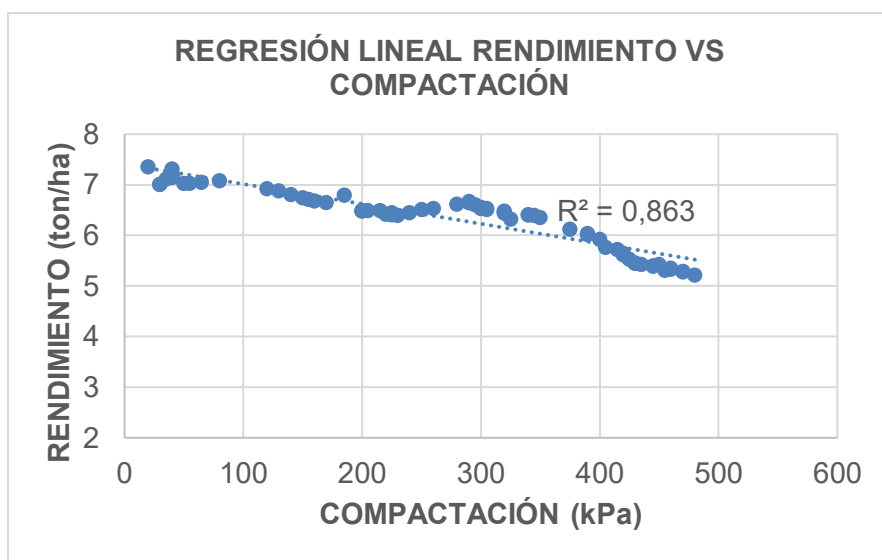
El valor del coeficiente de variación del 52% que indica la dispersión de un conjunto de datos respecto a la media supera el 30%, por lo cual, se considera que el conjunto de datos es heterogéneo. Teniendo un primer cuartil de 160, tercer cuartil de 400 y un intervalo Inter cuartil (IQR) de 240 para los datos de compactación.

En el caso de los valores de rendimiento, el coeficiente de variación fue de 9% lo que significa que la desviación estándar de estos valores es solo el 9% de la media. Esto indica que los valores son relativamente consistentes y no muestran mucha variación con respecto a la media.

6.2 Regresión lineal de los datos de producción y compactación.

La compactación del suelo puede influir significativamente en el rendimiento de los cultivos. En este análisis, se utiliza un modelo de regresión lineal para evaluar en qué medida la compactación del suelo puede predecir la producción de arroz, con la intención de comprender mejor cómo este factor influye en el rendimiento y contribuir a la toma de decisiones agrícolas. A continuación, se presenta la gráfica (**Figura 10**) de la regresión lineal entre ambas variables.

Figura 10. Regresión lineal de los valores de rendimiento y compactación.



El valor de R^2 de 0,86 indica que el 86% de la variabilidad del rendimiento puede explicarse por la compactación del suelo. Esto sugiere que existe una relación fuerte entre la compactación del suelo y el rendimiento de arroz. En otras palabras, el grado de compactación del suelo tiene un impacto significativo en la productividad del cultivo.

Aunque 0,86 es un valor relativamente alto, significa que hay un 14% de la variabilidad en la producción de arroz que no se explica por la compactación del suelo. Esto puede sugerir que otros factores, como las prácticas agrícolas, el riego, las condiciones climáticas, entre otros, también juegan un papel importante en la producción, sin embargo, este valor es una indicación de que la compactación del suelo es un factor clave en los rendimientos de arroz y que se debe prestar atención a su manejo en las prácticas agrícolas.

6.3 Determinación de interpolación espacial, IDW

Para modelar los datos de compactación del suelo, se aplicó el método de interpolación Inverse Distance Weighted (IDW). Este método permite representar de manera continua la distribución espacial de la compactación en el lote de cultivo de arroz, facilitando la identificación de zonas con mayor o menor resistencia mecánica.

La interpolación de los datos mediante IDW proporciona una visión detallada de cómo varía la compactación en el terreno. Esto es fundamental para evaluar el impacto en el desarrollo radicular y en la producción agrícola.

Posteriormente, se realizó un proceso de reclasificación de los valores de compactación obtenidos, organizando los datos en rangos específicos para facilitar su interpretación. Para ello, se utilizó la herramienta Análisis Ráster – Reclasificar por Tabla, lo que permitió distribuir equitativamente los resultados de los diferentes puntos de muestreo. Se definieron cinco categorías, considerando los valores mínimos y máximos registrados en el estudio, que fueron de 20 kPa a 479 kPa.

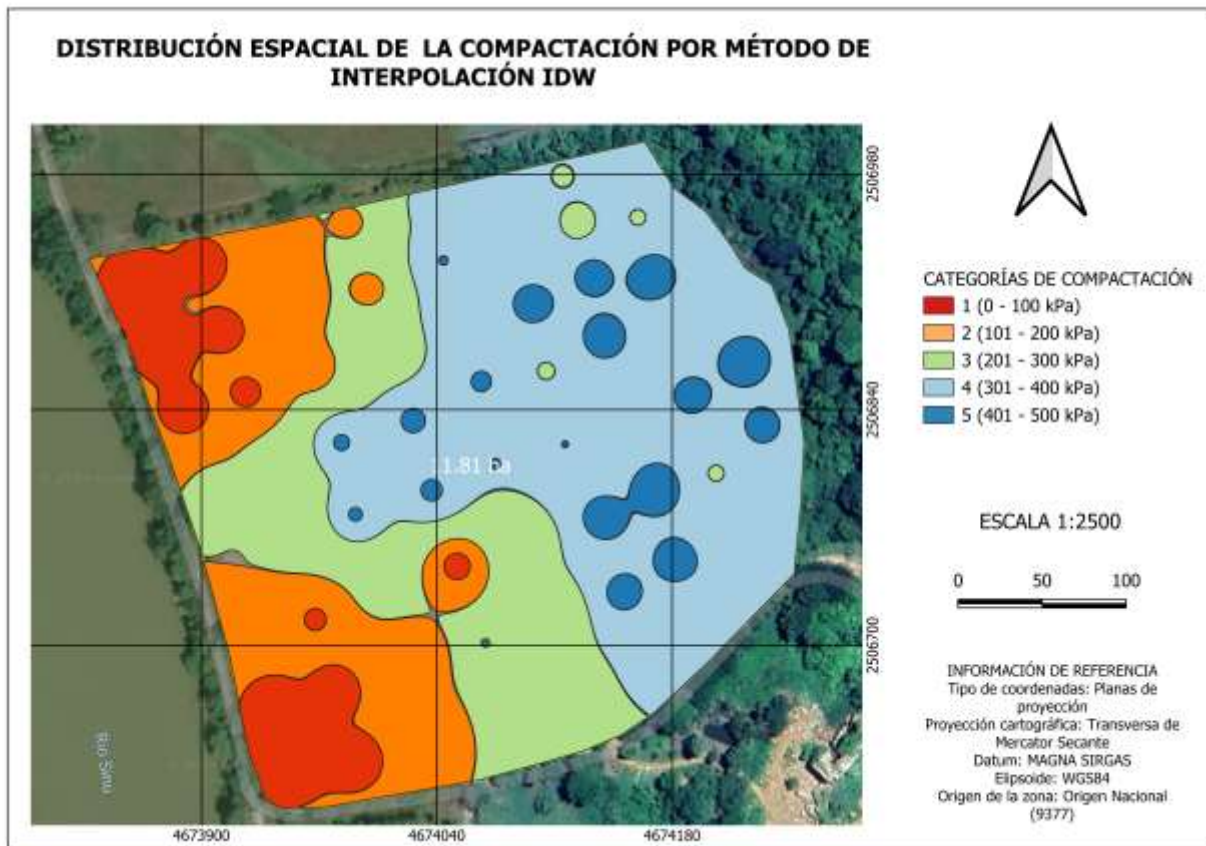
Finalmente, en la **Tabla 4** la reclasificación de los valores asignó zonas específicas dentro del lote según los niveles de compactación, permitiendo visualizar aquellas áreas donde la compactación es más elevada y podría representar un problema para el crecimiento de las raíces del cultivo. Esta información es clave para la planificación de estrategias de manejo del suelo, ya que posibilita la toma de decisiones en cuanto a prácticas de labranza, uso de maquinaria y aplicación de correctivos para mejorar la estructura del suelo y optimizar el rendimiento del arroz.

Tabla 4. Rangos Puntos de Muestreo, Resultado de Análisis Ráster – Reclasificar por Tabla de datos de compactación.

Rango	Mínimo	Máximo	Valor
1	0	100	1
2	101	200	2
3	201	300	3
4	301	400	4
5	401	500	5

En la **Figura 11** y en la **Tabla 5** presenta distribución espacial de la compactación por el método de interpolación IDW. En este caso, los datos de compactación se transforman en formato vectorial, lo que permite una visualización más precisa y detallada de la distribución de la compactación en el terreno. Este tipo de representación es útil para realizar análisis más específicos en sistemas de información geográfica (SIG) y facilitar la toma de decisiones en la gestión agronómica del lote.

Figura 11. Distribución espacial de la compactación por el método de interpolación IDW
Nota. Generada a través de Software QGIS.



A continuación, se presenta la **Tabla 5** con Leyenda de datos de compactación de la interpolación IDW

Tabla 5. Leyenda de datos de compactación de la interpolación IDW.

Compactación Rango (kPa)	Clasificación	Color
0 - 100	Muy Baja	Rojo
101 - 200	Baja	Naranja
201 - 300	Media	Verde
301 - 400	Alta	Celeste
401 - 500	Muy Alta	Azul

Destacamos en el análisis lo siguiente:

- El primer rango de compactación que va de 0 a 100 mPa, está representado en un área de 11.284,71 metros cuadrados, correspondiente al 9.6% del área total del lote.
- El segundo rango de compactación que va de 101 a 200 mPa, está representado en un área de 21.303,78 metros cuadrados, correspondiente al 18% del área total del lote.

- El tercer rango de compactación que va de 201 a 300 mPa, está representado en un área de 26.943,70 metros cuadrados, correspondiente al 22.8% del área total del lote.
- El cuarto rango de compactación que va de 301 a 400 mPa, está representado en un área de 50.911,84 metros cuadrados, correspondiente al 43.18% del área total del lote.
- El quinto rango de compactación que va de 401 a 500 mPa, está representado en un área de 6.009,75 metros cuadrados, correspondiente al 5.1% del área total del lote.

Según (Marroquin, 2018), La capacidad de las raíces para penetrar el suelo disminuye al aumentar la resistencia mecánica a la penetración, se considera limitante los valores mayores a 2 MPa. Los resultados encontrados indican que este lote no presenta problemas de compactación, por consiguiente, presenta una compactación baja, la cual no es una problemática para el desarrollo radicular del cultivo de arroz en este lote de estudio.

A partir de los hallazgos obtenidos, se realizó el modelamiento de los datos de rendimiento para interpolar la producción en todo el terreno. Este análisis permitió visualizar la distribución espacial de la productividad, facilitando la identificación de variaciones en el rendimiento del cultivo de arroz.

Para ello, se aplicó el método de interpolación Inverse Distance Weighted (IDW), utilizando los datos de producción recopilados en los puntos de muestreo. La interpolación generó una representación espacial continua del rendimiento, permitiendo identificar áreas de alta y baja productividad dentro del lote.

Posteriormente, se realizó un proceso de reclasificación de los valores interpolados con el objetivo de agrupar la producción en rangos específicos. La reclasificación facilita la interpretación de las zonas de alta, media y baja productividad, ayudando a visualizar patrones espaciales y diferencias en el rendimiento del cultivo.

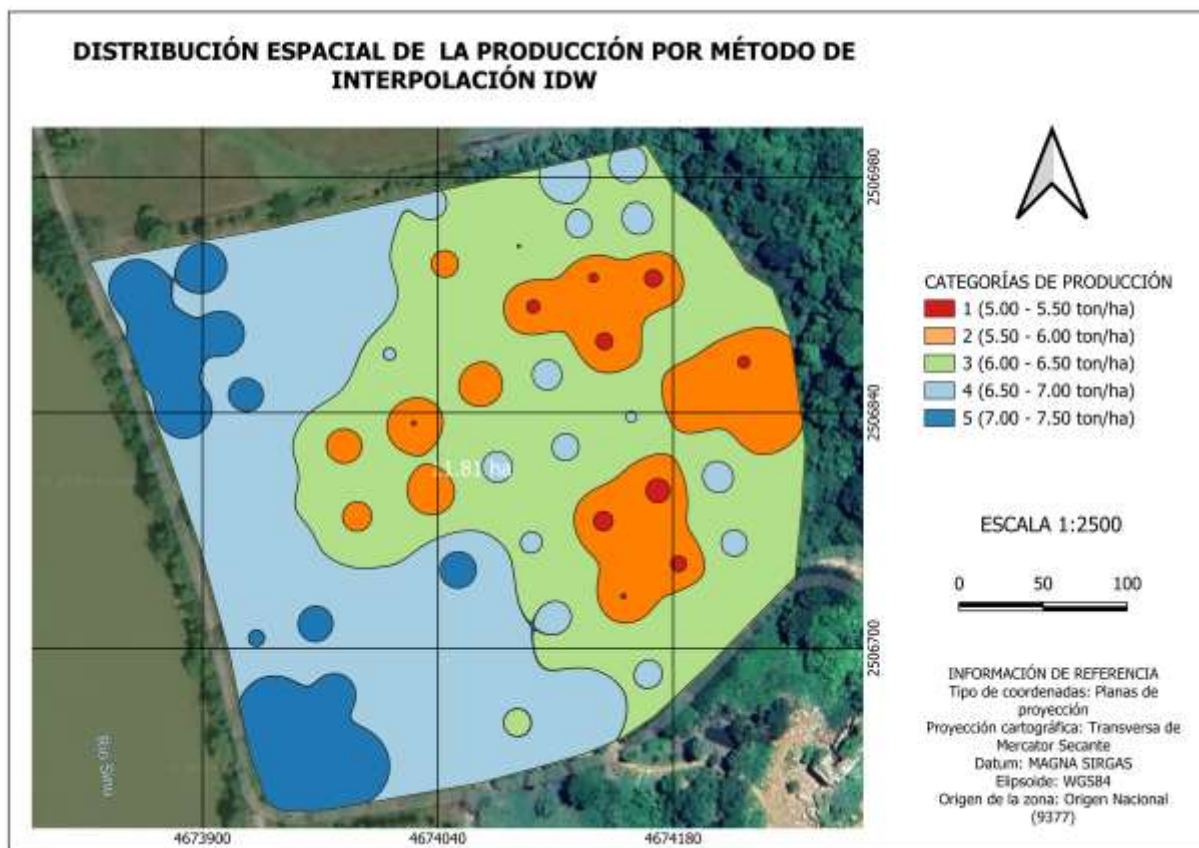
En la **Tabla 6**, se observan los rangos de los puntos de muestreo, resultado del análisis de ráster mediante la función "Reclasificar por Tabla". Este análisis ha asignado valores específicos a cada zona del terreno de acuerdo con la información de producción obtenida en los puntos de muestreo. Este análisis permitió identificar áreas que requieren mayor atención o intervención, optimizando la toma de decisiones en el manejo agronómico y en la planificación de estrategias para mejorar la producción.

Tabla 6. Rangos Puntos de Muestreo, Resultado de Análisis Ráster – Reclasificar por Tabla.

Rango	Mínimo	Máximo	Valor
1	5.00	5.50	5.50
2	5.51	6.00	6.00
3	5.01	6.50	6.50
4	6.51	7.00	7.00
5	7.01	7.50	7.50

La **Figura 12** y **Tabla 7** muestra el ráster vectorizado con la información de muestreo de producción. Este ráster vectorizado representa las áreas de producción del cultivo con mayor precisión y detalle, transformando la información de muestreo en una forma vectorial que permite una mejor visualización y análisis de las variaciones espaciales. El proceso de vectorización es útil para integrar esta información en sistemas de información geográfica (SIG), lo que facilita el análisis y la toma de decisiones en el manejo del cultivo.

Figura 12. Distribución espacial de la producción por el método de interpolación IDW



A continuación, se presenta la **Tabla 5** con Leyenda de datos de productividad de la interpolación IDW

Tabla 7. *Leyenda de datos de productividad de la interpolación IDW*

Rango de Productividad (t/ha)	Clasificación	Colores
>7	Alta	Azul
6.5 - 7	Media-Alta	Celeste
6 - 6.5	Media	Verde
5.5 - 6	Baja	Naranja
<5.5	Muy Baja	Rojo

En este apartado se identificaron cinco categorías de productividad para el cultivo de arroz, clasificadas en un gradiente de colores que reflejan distintos niveles de producción en toneladas por hectárea. El área de mayor productividad, representada en color azul, corresponde al rango de 7.00 a 7.50 toneladas por hectárea y abarca 11,643.6 m², equivalentes al 9.90% del

lote. Estas zonas son óptimas para el desarrollo del cultivo y reflejan condiciones favorables de suelo y manejo agronómico.

La categoría en color celeste incluye áreas con una producción alta-media, que se encuentran en el rango de 6.50 a 7.00 toneladas por hectárea. Este segmento ocupa 42,155.64 m², lo que equivale al 35.86% del lote total. Estas áreas presentan un buen potencial productivo, aunque podrían beneficiarse de prácticas de manejo específicas para optimizar su rendimiento.

El color verde representa la categoría de producción media, con un rango de 6.00 a 6.50 toneladas por hectárea. Esta es la categoría más extensa, abarcando 46,606.1 m², lo que corresponde al 39.64% del área total. Estas zonas muestran una productividad estable, pero con margen de mejora mediante la implementación de estrategias agronómicas enfocadas en el manejo del suelo y la nutrición del cultivo.

Las áreas de baja producción están identificadas en color naranja, con un rango de 5.50 a 6.00 toneladas por hectárea. Estas zonas representan 16,559.17 m², es decir, el 14.08% del lote. Por último, la categoría de muy baja productividad, en color rojo, se encuentra en el rango de 5.00 a 5.50 toneladas por hectárea y ocupa solo 605.53 m², lo que representa un 0.52% del lote.

La productividad está categorizada en cinco rangos: 5.00-5.50 ton/ha (605.53 m²), 5.50-6.00 ton/ha (16,559.17 m²), 6.00-6.50 ton/ha (46,606.1 m²), 6.50-7.00 ton/ha (42,155.64 m²), y 7.00-7.50 ton/ha (11,643.6 m²). Es notable que las zonas de mayor productividad (azul oscuro) tienden a concentrarse hacia el oeste del lote, cerca del Río Sinú, mientras que las áreas de menor producción (rojo y naranja) se encuentran más hacia el este. El mapa mantiene la misma escala y georreferenciación que el anterior, permitiendo una comparación directa entre la compactación y la producción.

En general, este análisis permite identificar patrones de variabilidad espacial en la producción del arroz, proporcionando información clave para ajustar las prácticas de manejo agronómico según las necesidades de cada área. Esto incluye labores de mejoramiento del suelo y estrategias de riego que podrían maximizar el rendimiento en las zonas menos productivas.

En Colombia, en términos económicos el arroz ocupa el primer lugar entre los cultivos de ciclo corto. Colombia es el segundo país productor de arroz de América Latina y del Caribe. El arroz mecanizado representa el 98% de la producción Nacional y al menos el 95% del área total sembrada en el país, la cual fluctúa entre las 400 a 500 mil hectáreas por año. El arroz se siembra en dos sistemas: secano con una producción promedio de 4,7 t/ha y riego mecanizado que puede alcanzar producciones de hasta 6,5 t/ha. (Bayer, 2023).

El departamento de Córdoba hace parte de la zona arrocerá de Bajo Cauca, junto con Antioquia, Bolívar, Chocó y Sucre, para el año 2023 el área sembrada de riego mecanizado fue de 6.204 ha, con un rendimiento de 5,3 t/ha de arroz Paddy Verde. (Fedearroz, Federación Nacional de Arroceros, s.f.).

Los rendimientos en el cultivo de arroz varían de acuerdo con la implementación de las buenas prácticas agrícolas, así como la época de siembra, primer o segundo semestre del año, siendo la condición de riego mecanizado la característica más importante para que la variedad exprese su máximo potencial, las cuales varían entre 6 a 8 t/ha, como lo referencian rendimientos promedios para los departamentos del Huila y Tolima de 7,5 t/ha para cada uno. (Fedearroz, Federación Nacional de Arroceros, s.f.).

Igualmente, trabajos realizados por la Universidad de Córdoba donde se evaluaron el crecimiento y rendimiento de cuatro variedades y una línea avanzada de arroz, se evidenció que uno de los materiales estuvo por encima de las 7,16 t/ha de arroz Paddy Verde y promedios de

6,51 y 6,44 t/ha respectivamente como segundo y tercer rendimiento en t/ha de arroz. (Burgos , 2021)

6.4 Determinación de interpolación espacial, Kriging

Se realizó la interpolación Kriging de los datos de producción de arroz y compactación del suelo utilizando el modelo esférico. Para la interpolación, el tamaño del intervalo se estableció en 1,434, lo que permitió analizar las relaciones espaciales de los datos con una resolución adecuada, optimizando el proceso y garantizando una estimación precisa de la compactación y la producción en el campo. continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante este método, incluyendo los parámetros de interpolación, las distribuciones espaciales y la interpretación de los patrones detectados.

6.4.1 Interpolación de los Datos de Producción

La **Tabla 8** presenta los parámetros obtenidos para la interpolación Kriging aplicada a los datos de producción de arroz.

Tabla 8. *Parámetros de interpolación Kriging para la producción*

Parámetro	Valor
Partial Sill	0.314297
Nugget	0.188134
Major Range	412.992.000

El Partial sill representa la variabilidad global en los datos, es decir, la cantidad total de variabilidad que es explicable a través de la estructura espacial del modelo. Un valor de 0.314297 sugiere que existe una cantidad moderada de variabilidad explicable a escala más

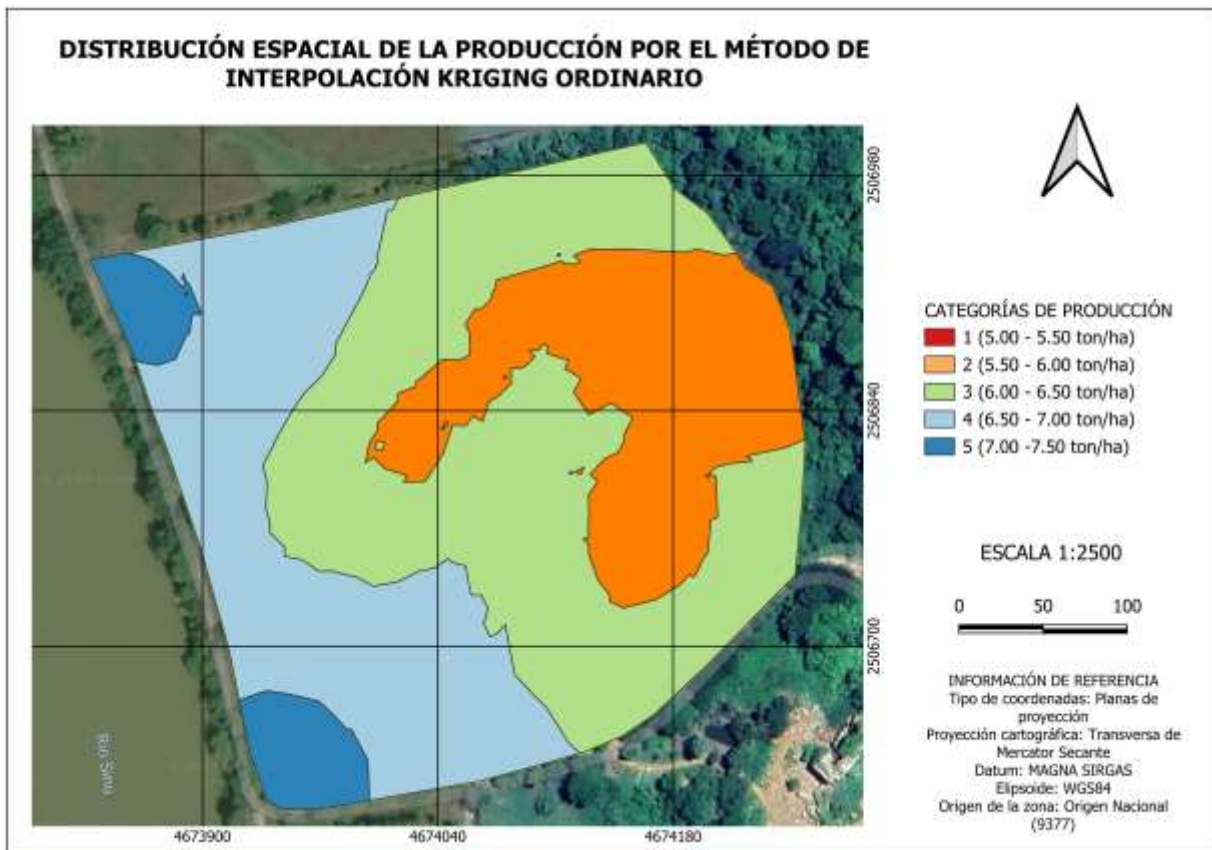
grande, es decir, que los datos muestran un comportamiento o tendencia que puede extenderse más allá de las distancias cercanas entre puntos.

El Nugget mide la variabilidad a pequeña escala o variación no explicada por el modelo. Un valor de 0.188134 indica que una proporción significativa de la variabilidad en los datos es a una escala muy local (cercana a cero), como puede ser ruido de medición o fluctuaciones que no siguen un patrón espacial claro. Este valor sugiere que, aunque hay una tendencia global (capturada por el sill), existe una variabilidad a pequeña escala que no se puede modelar completamente con el modelo de Kriging.

El Major Range(alcance principal) determina la distancia máxima a la cual los puntos de muestreo siguen correlacionados entre sí. Un valor de 412.992 sugiere que las correlaciones espaciales en los datos persisten a distancias relativamente grandes. Esto implica que los datos tienen una estructura de correlación a gran escala.

La distribución espacial de la producción obtenida con Kriging se presenta en la **Figura 13**.

Figura 13. *Distribución espacial de la producción mediante interpolación Kriging Ordinario*



Los rangos de productividad usados en el mapa son los mismos para la interpolación IDW, se puede observar que con la interpolación Kriging se presenta en el lote una producción baja a alta y las áreas presentan transiciones suaves, naturales y continuas entre rangos, sin embargo, el mapa generado de acuerdo con esta interpolación no refleja los puntos de producción muy bajos.

- El segundo rango de producción que va de 5,5 a 6 t/ha, está representado en un área de 6.691,77 metros cuadrados, correspondiente al 5,7% del área total del lote.
- El tercer rango de producción que va de 6 a 6,5 t/ha, está representado en un área de 35.520,13 metros cuadrados, correspondiente al 30,1% del área total del lote.

- El cuarto rango de producción que va de 6,5 a 7 t/ha, está representado en un área de 49.370,18 metros cuadrados, correspondiente al 41,8% del área total del lote.
- El quinto rango de producción que va de 7 a 7,5 t/ha, está representado en un área de 49.370,18 metros cuadrados, correspondiente al 22,4.4% del área total del lote.

A continuación, se presenta la leyenda correspondiente a cada categoría de productividad (**Tabla 9**).

Tabla 9. *Leyenda de datos de productividad interpolación Kriging*

Rango de Productividad (t/ha)	Clasificación	Colores
>7	Alta	Azul
6.5 - 7	Media-Alta	Celeste
6 - 6.5	Media	Verde
5.5 - 6	Baja	Naranja
<5.5	Muy Baja	Rojo

A continuación, se presenta Distribución de productividad en interpolación Kriging **Tabla 10**

Tabla 10. *Distribución de productividad en interpolación Kriging*

Categoría	Producción	%
2	26,508.36265	22.4%
3	49,370.18352	41.8%
4	35,520.13867	30.1%
5	6,691.77529	5.7%
Total	118,090.4601	100%

6.4.2 Interpolación Datos de Compactación.

Para la compactación del suelo, se aplicó la interpolación **Kriging Ordinario** utilizando un modelo esférico. **Tabla 11** presenta los parámetros obtenidos en este proceso.

Tabla 11. *Parámetros interpolación Kriging para la compactación .*

Parámetro	Valor
Partial Sill	35,777.325905
Nugget	0.000000
Major Range	412.992.000

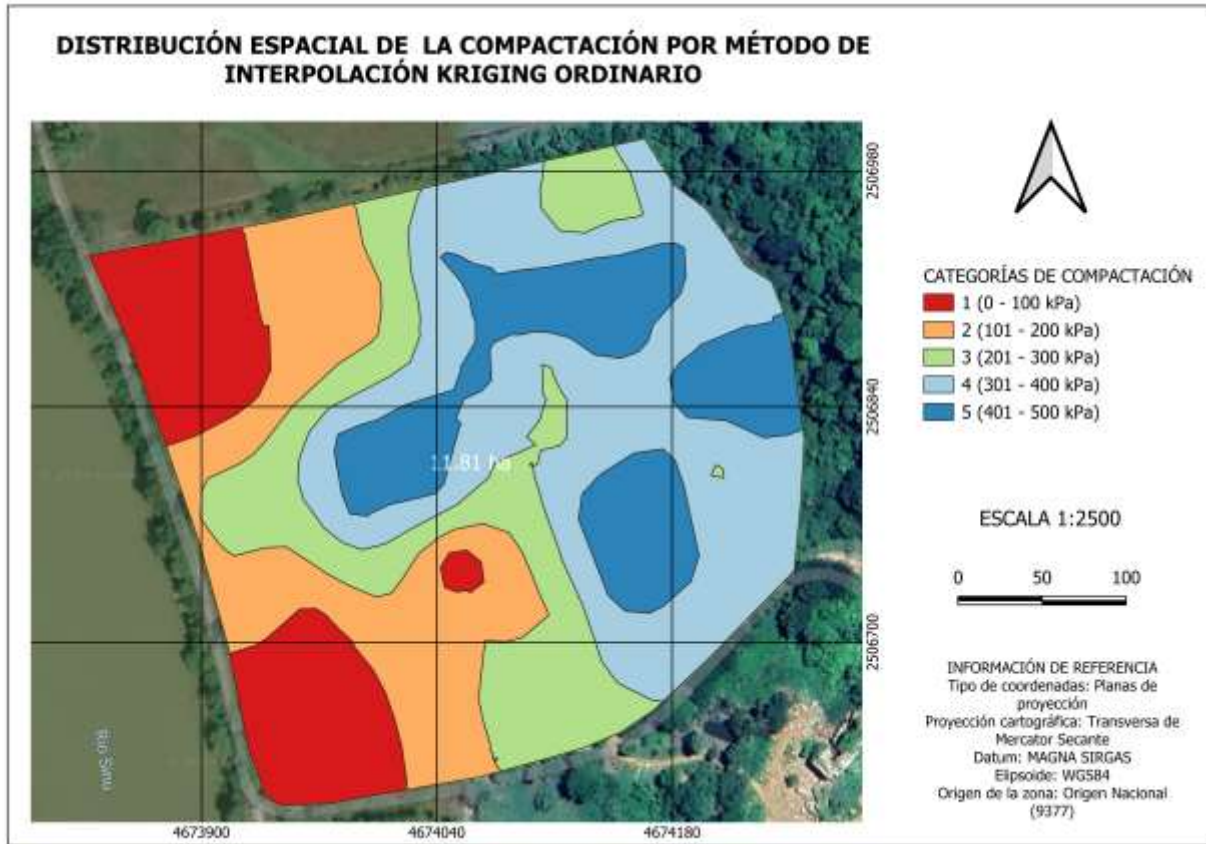
El valor de Partial sill de 35777.325905 sugiere que los datos de compactación tienen una variabilidad significativa a distancias largas o medias. Esto puede sugerir el patrón espacial que tiene una estructura global importante, es decir, que las diferencias en los valores de la variable están muy relacionadas con distancias espaciales mayores.

El Nugget de valor 0 indica que no hay variabilidad significativa en escalas pequeñas, o al menos no se ha registrado error de medición en el modelo.

El Major Range de valor 412.992 indica que la influencia espacial del fenómeno se extiende hasta aproximadamente 413 m. Después de esta distancia, los puntos dejan de estar correlacionados significativamente.

La **Figura 14** presenta la distribución espacial de la compactación obtenida mediante interpolación Kriging.

Figura 14. Distribución espacial de la compactación por el método de interpolación Kriging Ordinario



Los rangos de compactación usados en el mapa son los mismos para la interpolación IDW, se puede observar que con la interpolación Kriging se presenta en el lote una compactación muy baja a Muy alta, las áreas del modelo presentan transiciones suaves, naturales y continuas entre rangos. A continuación, se relacionan las áreas de cada rango.

- El primer rango de compactación que va de 0 a 100 kPa, está representado en un área de 18152, 60 metros cuadrados, correspondiente al 15.4% del área total del lote.

- El segundo rango de compactación que va de 101 a 200 kPa, está representado en un área de 22415.12 metros cuadrados, correspondiente al 19% del área total del lote.
- El tercer rango de compactación que va de 201 a 300 kPa, está representado en un área de 21428.07 metros cuadrados, correspondiente al 18.1% del área total del lote.
- El cuarto rango de compactación que va de 301 a 400 kPa, está representado en un área de 36762.84 metros cuadrados, correspondiente al 31.1% del área total del lote.
- El quinto rango de compactación que va de 401 a 500 kPa, está representado en un área de 19331.79 metros cuadrados, correspondiente al 16.4% del área total del lote.

A continuación, se presenta en la **Tabla 12** la Leyenda de datos de compactación interpolación Kriging

Tabla 12. *Leyenda de datos de compactación interpolación Kriging.*

Compactación Rango (kPa)	Clasificación	Color
0 - 100	Muy Baja	Rojo
101 - 200	Baja	Naranja
201 - 300	Media	Verde
301 - 400	Alta	Celeste
401 - 500	Muy Alta	Azul

A continuación, se presenta en la **Tabla 13** la distribución de compactación en interpolación Kriging

Tabla 13. *Distribución de compactación en interpolación Kriging*

Categoría	Compactación	%
1	18,152.60523	15.4%
2	22,415.12399	19.0%
3	21,428.07897	18.1%

4	36,762.84288	31.1%
5	19,331.79002	16.4%
Total	118,090.4411	100%

6.5 Propuestas Técnicas para el Manejo Productivo del Cultivo de Arroz e Interpretación de Resultados

Se realizó el análisis espacial de la variabilidad de la compactación del suelo y del rendimiento del cultivo de arroz (*Oryza sativa*) en cultivo de riego para determinar su interrelación y cómo el rendimiento se puede ver afectado o mejorado según esta característica del suelo.

6.5.1 Comparación de resultados método de Kriging e IDW

La compactación del suelo es un factor crítico que influye directamente en la productividad agrícola, ya que afecta la infiltración y retención de agua, la aireación del suelo y el desarrollo radicular de los cultivos. Un suelo altamente compactado reduce la disponibilidad de oxígeno y agua para las raíces, limitando la absorción de nutrientes y disminuyendo el rendimiento del cultivo. Investigaciones previas han demostrado que el tránsito de maquinaria pesada y un manejo inadecuado del suelo pueden incrementar significativamente su compactación, generando condiciones desfavorables para el crecimiento de las plantas (Håkansson & Lipiec, 2000; Becerra et al., 2018).

En este estudio, se compararon dos métodos de interpolación espacial, Kriging Ordinario e IDW (Inverse Distance Weighting), para analizar la distribución de la compactación del suelo y

la producción en un cultivo de arroz. Kriging, basado en la estadística geoestadística, tiende a suavizar las variaciones espaciales debido a su modelado de la autocorrelación espacial. En contraste, IDW permite capturar con mayor detalle las variaciones locales, asignando más peso a los valores más cercanos, lo que da como resultado mapas más precisos y representativos de la heterogeneidad del campo.

Los resultados obtenidos muestran que IDW proporciona una representación más granular y detallada de los patrones espaciales de compactación y producción en comparación con Kriging. Los mapas generados mediante IDW permiten identificar con mayor claridad zonas específicas de alta compactación y baja producción, lo que facilita la toma de decisiones para implementar estrategias de manejo diferenciadas. En contraste, la interpolación Kriging tiende a generar superficies más homogéneas, lo que puede ocultar variaciones críticas dentro del lote.

Estos hallazgos concuerdan con estudios previos, como el de Munyati & Sinthumule (2021), quienes compararon ambos métodos en ecosistemas de sabana y bosque, concluyendo que IDW es más adecuado para representar gradientes espaciales en áreas con alta variabilidad. Su estudio demostró que Kriging suaviza transiciones importantes, lo que puede afectar la precisión en la detección de microzonas clave. Aplicando este mismo principio al presente estudio, se observa que IDW captura mejor las fluctuaciones espaciales en la compactación del suelo y la producción del arroz, lo que lo convierte en una herramienta más efectiva para el análisis y la planificación agrícola.

Desde una perspectiva agronómica, los resultados confirman la relación inversa entre la compactación del suelo y la producción del arroz. Las zonas con mayor compactación tienden a presentar menores rendimientos, lo que refuerza la importancia de un monitoreo detallado para

aplicar estrategias de mitigación, como la reducción del tránsito de maquinaria, la labranza profunda o la optimización del riego. IDW permite detectar con mayor precisión estas micro zonas problemáticas, facilitando la implementación de medidas específicas para mejorar las condiciones del suelo y maximizar la productividad del cultivo.

Entre el IDW y Kriging evidencia que IDW es el método más adecuado cuando se requiere alta precisión en la detección de variabilidad espacial. La capacidad de IDW para representar cambios locales con mayor fidelidad lo convierte en una herramienta clave para la gestión del suelo y la producción agrícola. Al proporcionar mapas detallados y más representativos de la realidad del campo, IDW permite una planificación más eficiente y sustentable, optimizando el uso de insumos y favoreciendo una mejor toma de decisiones en el manejo del cultivo de arroz.

6.5.2 Interpretación Espacial de la Producción

En la **Tabla 14** se presentan los datos históricos de producción en el cultivo de arroz para los años 2022, 2023 y 2024, registrados en diez puntos de muestreo dentro del lote de estudio:

Tabla 14. Históricos de producción en el cultivo de arroz para los años 2022, 2023 y 2024

PUNTO	2022	2023	2024
1	4.0	4.1	5.21
2	4.4	4.5	5.29
3	4.6	4.8	5.31

PUNTO	2022	2023	2024
4	4.9	4.8	5.28
5	4.5	4.6	5.39
6	5.3	5.5	5.42
7	5.5	5.5	5.46
8	5.7	5.9	5.53
9	5.9	5.7	5.65
10	6.1	6.6	5.72

Nota. Unidades: Toneladas/Hectárea (ton/ha)

El análisis de los datos históricos de producción en el cultivo de arroz revela variaciones en el rendimiento en los diferentes puntos de muestreo entre 2022 y 2024. Se observa un incremento en la producción en los puntos 1, 2, 3, 4 y 5 en 2024 en comparación con los años anteriores. Este aumento podría estar relacionado con factores como condiciones climáticas favorables o mejoras en el manejo del cultivo.

Sin embargo, en otros puntos (6, 7, 8, 9 y 10), se observa una leve disminución en la producción en 2024 respecto a 2023. Esto podría asociarse a factores como la compactación del suelo, variaciones en la fertilidad o problemas en el drenaje, afectando el desarrollo del cultivo.

Es importante destacar que no se tiene conocimiento de que se hayan implementado prácticas específicas de manejo para la compactación del suelo en el área de estudio hasta la fecha. Esto sugiere que las variaciones en la producción podrían estar influenciadas por la distribución espacial de la compactación, la cual afecta la absorción de nutrientes y agua por parte del cultivo de arroz.

Estos datos resultan esenciales para la interpretación agronómica, ya que permiten identificar las zonas donde el rendimiento ha mejorado de forma notable y aquellas en las que es necesario profundizar el diagnóstico para optimizar la producción. Además, la comparación de estos datos con los mapas de interpolación (especialmente IDW) aporta una visión espacial detallada de cómo varían los rendimientos y facilita la toma de decisiones sobre el manejo del cultivo y del suelo.

6.5.3 Interpretación agronómica de patrones espaciales

El componente principal a la resistencia de la penetración en el presente trabajo para las raíces del cultivo de arroz es expresado en kPa (kilo pascales) y se le llama compactación. En el lote evaluado, la compactación tiene un comportamiento relativo que aumenta de Este a Oeste, en donde se evidencian cúmulos de forma circular correspondientes a zonas de compactación >401 kPa, lo cual no representa un problema para el desarrollo del cultivo del arroz, una zona media que muestra una compactación de entre 201 y 300 kPa, y una zona de compactación baja la cual se encuentra hacia el Este, junto al borde del Río Sinú y que igualmente presenta dos polos de baja compactación <100 kPa a las esquinas noroeste y suroeste del lote analizado, los cuales coinciden con el ingreso y evacuación del agua de riego.

- Se definieron 5 categorías para clasificar la compactación del lote siendo la categoría 1 la de menor compactación y 5 la de mayor compactación. Por lo tanto, la categoría 5 tiene un área de 6009.5 m² y representa el 5.1% del área total del lote, la categoría 4 tiene un área de 50911.84 m² y representa el 43.1%, la categoría 3 tiene un área de 26943.84 m² y representa el 22.8%, la categoría 2 tiene un área de 21303.78m² y representa el 18% y la categoría 1 tiene un área de 11284.71 m² y representa el 9.6% del área total del lote.

- Se determinó la interpolación IDW con el componente de la variabilidad espacial, la compactación, para realizar el análisis de la compactación del suelo en el cultivo de arroz en el lote propuesto.
- Teniendo en cuenta los resultados, se plantean las siguientes propuestas para el manejo productivo del cultivo de arroz:
 - a. En las zonas de mayor compactación se recomienda realizar intervención en el terreno mediante labores de mecanización con cincel rígido o vibratorio.
 - b. Una adecuada preparación del suelo con problemas de compactación permite que el cultivo aproveche su máximo potencial genético, logrando productividades superiores a suelos con limitaciones en la compactación.

6.5.4 Planteamientos de Propuestas Técnicas de Manejo para la Optimización del Cultivo de Arroz

Los resultados obtenidos indican que las zonas clasificadas en las categorías 4 y 5 (5.69 ha, equivalentes al 48.2% del área total) deben ser intervenidas para romper capas compactadas y mejorar la productividad. De lo anterior podemos concluir que las labores de mecanización se optimizarían de tal forma que se reducen los costos de producción y se minimiza la intervención al suelo, en especial la estructura en su parte física. A partir de estos hallazgos, se plantean las siguientes estrategias de manejo:

1. Manejo del suelo y reducción de la compactación

- Implementar labores de mecanización en las zonas de alta compactación utilizando cinceles rígidos o vibratorios para mejorar la estructura del suelo.

- Evitar el tráfico excesivo de maquinaria en las áreas más susceptibles a la compactación.

2. Optimización de la producción según la compactación

- En suelos con compactación moderada, ajustar la fertilización y el riego para maximizar la absorción de nutrientes.
- Implementar rotaciones de cultivos con especies de raíces profundas que ayuden a descompactar naturalmente el suelo.

3. Uso de IDW para el monitoreo continuo

- Debido a la precisión de IDW en la identificación de zonas críticas, se recomienda su uso en futuras evaluaciones para realizar un seguimiento detallado de los cambios en la compactación y la producción.
- Comparar IDW con otros métodos en estudios posteriores para evaluar su efectividad en distintos escenarios productivos.

4. Implementación de tecnologías de agricultura de precisión

- Utilizar sensores de compactación, imágenes satelitales y NDVI para mejorar el monitoreo de las condiciones del suelo y la salud del cultivo.
- Aplicar herramientas de interpolación espacial para ajustar prácticas agronómicas de forma más precisa.

7. Conclusiones

El primer objetivo permitió validar la consistencia entre los hallazgos y los estudios previos de Gutiérrez (2018) y FEDEARROZ (2022), confirmando la importancia de la compactación en suelos arroceros y estableciendo que valores inferiores a 2MPa son óptimos para el desarrollo radicular del cultivo de arroz, evidenciando una correlación significativa entre esta variable y la producción.

Respecto al segundo objetivo, la investigación corroboró los fundamentos teóricos sobre la compactación del suelo y su impacto en el cultivo de arroz. Los resultados obtenidos se alinearon con la literatura científica, validando la importancia de la compactación en la relación suelo-agua-planta y su influencia directa en el desarrollo del cultivo.

En cuanto al tercer objetivo, el análisis de la variabilidad espacial reveló patrones significativos de compactación en el lote estudiado, con valores entre 20 y 480 kPa. La implementación de la interpolación IDW identificó cinco categorías de compactación, siendo predominante la que ocupa el 43.18% del área con valores entre 301-400 kPa, permitiendo desarrollar propuestas técnicas basadas en esta caracterización espacial.

Como conclusión integradora, el análisis de la variabilidad espacial de la compactación del suelo demostró ser una herramienta efectiva para la caracterización y mejora potencial de la producción del cultivo de arroz en Montería, Córdoba. Los resultados permitieron identificar zonas específicas que requieren intervención, aunque los niveles de compactación encontrados no superan los límites críticos para el desarrollo del cultivo

El análisis de la distribución espacial de la productividad reveló una clara diferenciación en zonas de rendimiento, donde las áreas de alta producción (7.00 a 7.50 ton/ha) representan el 9.90% del lote, mientras que las zonas de producción media-alta (6.50 a 7.00 ton/ha) ocupan el 35.86%. La compactación del suelo mostró un patrón espacial definido, con un gradiente que aumenta de Este a Oeste, identificándose zonas críticas con valores superiores a 401 kPa que representan el 48.2% del área total del lote.

La caracterización espacial mediante interpolación IDW permitió identificar efectivamente cinco categorías de compactación, donde las categorías 4 y 5 (mayor compactación) ocupan 5.69 hectáreas del lote. Esta distribución coincide con patrones de productividad, observándose que las zonas de menor compactación, especialmente aquellas cercanas al Río Sinú y en las esquinas noroeste y suroeste, presentan condiciones más favorables para el desarrollo del cultivo.

La compactación del suelo sigue un patrón espacial amplio, con una correlación significativa hasta aproximadamente 412,99 m. Esto indica que la compactación no es un fenómeno localizado, sino que se distribuye de manera extendida en el terreno. La ausencia de un nugget sugiere que la variabilidad a pequeña escala es baja, lo que puede deberse a mediciones precisas o a cierta uniformidad local en las condiciones del suelo. Estos resultados resaltan la importancia de considerar la variabilidad espacial a gran escala en el manejo agrícola para optimizar las prácticas de preparación del suelo.

El método de interpolación Kriging permite modelar la compactación del suelo a gran escala, pero no representa bien las variaciones locales. Aunque el variograma esférico evidencia una correlación espacial fuerte, una parte de la variabilidad de la compactación no es explicada

completamente por el modelo, posiblemente debido a la heterogeneidad del suelo o la distribución del muestreo. Además, Kriging tiende a suavizar los valores, lo que puede ocultar microzonas críticas. Esto limita su utilidad en la identificación de pequeñas áreas con alta compactación, lo que hace necesario evaluar métodos alternativos, como IDW, para un análisis más detallado.

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la interpolación IDW (Inverse Distance Weighting) es el método más adecuado para analizar la variabilidad espacial de la compactación del suelo y la producción en el cultivo de arroz de acuerdo con la metodología de muestreo utilizada. En comparación con Kriging Ordinario, IDW proporciona una representación más detallada y precisa de los cambios espaciales, lo que permite identificar con mayor claridad las zonas de alta compactación y las áreas con menor rendimiento productivo.

El análisis de los datos históricos no permite establecer una clara relación o evidencia de que la compactación del suelo influye negativamente en la producción de arroz. Esto se debe a la falta de información disponible, ya que los datos analizados muestran una fluctuación tanto positiva como negativa sin un patrón diferenciado.

La mayor precisión de IDW facilita la detección de microzonas críticas dentro del lote de cultivo, lo que permite desarrollar estrategias de manejo específicas, tales como:

- Reducción del tránsito de maquinaria en zonas con alta compactación.
- Implementación de prácticas de subsolado para mejorar la estructura del suelo.
- Optimización del riego en función de las características del suelo y su compactación.

Asimismo, los hallazgos de este estudio concuerdan con investigaciones previas, como la de Munyati & Sinthumule (2021), donde se demostró que IDW es más eficaz en entornos con alta variabilidad espacial cuando los datos de muestreo están dispersos, como en el presente estudio. Por el contrario, Kriging tiende a suavizar los valores interpolados, lo que puede ocultar

fluctuaciones importantes en el campo, requiriendo así una mayor densidad de puntos de muestreo y un menor espaciamiento entre ellos para obtener resultados más precisos.

La elección de IDW sobre Kriging se justifica por su capacidad de representar con mayor fidelidad la heterogeneidad del suelo y la producción, lo que favorece un análisis más detallado para la planificación y gestión agrícola.

8. Recomendaciones

Se sugiere establecer una correlación entre los resultados del análisis de compactación y los valores de producción obtenidos posteriormente. Además, es recomendable realizar un análisis temporal que contemple las acciones implementadas para intervenir el suelo, con el fin de evaluar su efectividad a lo largo del tiempo.

Es fundamental establecer un sistema integral de monitoreo y seguimiento que permita correlacionar los resultados del análisis de compactación del suelo con los valores de producción obtenidos posteriormente. Esto debe incluir un análisis temporal que contemple las acciones implementadas para intervenir el suelo, con el objetivo de evaluar su efectividad a lo largo del tiempo.

Para aumentar la precisión en futuros estudios, se recomienda realizar los muestreos con un penetrómetro a intervalos más reducidos, idealmente cada 20 metros. Además, se sugiere tomar mediciones a diferentes profundidades, entre 5 y 20 cm, para un análisis más detallado de la variabilidad en el perfil del suelo, enfocándose especialmente en los primeros 20 cm, donde se concentra el desarrollo radicular del arroz. La incorporación de tecnologías avanzadas, como la plataforma VERIS, podría complementar estas acciones, siguiendo modelos exitosos como el de FEDEARROZ.

En términos de manejo productivo, es crucial mantener la compactación del suelo por debajo de los 2 MPa mediante prácticas de labranza apropiadas que optimicen la circulación de gases y minimicen la emisión de gases de efecto invernadero.

Las áreas con mayor compactación (5.69 hectáreas identificadas) requieren una mecanización diferenciada, utilizando cinceles rígidos o vibratorios para mejorar la estructura del

suelo. Es imprescindible establecer un sistema de monitoreo periódico que permita evaluar la efectividad de estas intervenciones y ajustar las prácticas de manejo según sea necesario.

Adicionalmente, se propone adoptar un enfoque de manejo sitio-específico basado en la variabilidad espacial identificada:

- Zonas de alta y media productividad (azul y celeste): Mantener las prácticas agronómicas actuales y realizar un monitoreo continuo para garantizar la estabilidad de los rendimientos.
- Zonas de productividad media (verde): Implementar programas de fertilización específicos y evaluar las condiciones hídricas para asegurar un equilibrio adecuado de nutrientes y humedad.
- Zonas de baja y muy baja productividad (naranja y rojo): Establecer un plan integral de mejoramiento que incluya labores de cincelado, optimización del riego y programas de fertilización ajustados a las necesidades específicas de cada área, con el fin de incrementar la productividad y disminuir los costos.

Por último, es esencial optimizar las labores de mecanización concentrándolas en las áreas críticas identificadas. Este enfoque permite reducir costos y minimizar intervenciones innecesarias en la estructura física del suelo. Complementado con un programa de monitoreo continuo, este sistema permitirá evaluar la evolución de la compactación y su impacto en la productividad del cultivo de arroz.

Se recomienda la implementación de estrategias de manejo del suelo para reducir la compactación, como el cincelado en las zonas críticas identificadas mediante IDW, la rotación de cultivos y la optimización del tráfico de maquinaria para minimizar la degradación del suelo. Además, se sugiere ajustar la aplicación de insumos según la variabilidad espacial del terreno,

implementando un riego y fertilización diferenciados en función de las zonas con mayor afectación por compactación.

En cuanto al monitoreo continuo, dado que IDW ha demostrado ser más preciso en la identificación de variaciones locales en la compactación y la producción, se recomienda su uso para futuras evaluaciones espaciales del cultivo de arroz. Esto permitirá realizar un seguimiento más detallado de la productividad y la calidad del suelo a lo largo del tiempo, facilitando la toma de decisiones para mejorar la gestión agrícola.

Si bien IDW ha resultado ser el método más adecuado en este análisis, se recomienda que futuras investigaciones incluyan otros enfoques de interpolación espacial, como Kriging con tendencia o Regresión Geográficamente Ponderada (GWR), para evaluar su desempeño en el análisis de compactación y producción. Estos métodos podrían ofrecer una mejor representación de las tendencias espaciales en escenarios con mayor densidad de puntos de muestreo. Asimismo, para mejorar el monitoreo de la compactación y la producción, se sugiere la incorporación de sensores de compactación, imágenes satelitales e índices de vegetación (NDVI). Estas tecnologías permitirán una recolección de datos más precisa y un análisis más detallado mediante IDW u otros métodos de interpolación.

Finalmente, se recomienda la extensión del estudio a diferentes ciclos productivos del cultivo de arroz para evaluar cómo evoluciona la compactación del suelo a lo largo del tiempo y su impacto en la productividad. Esto permitirá diseñar estrategias de manejo más efectivas y sostenibles. La implementación de estas recomendaciones contribuirá a optimizar el uso de insumos, mejorar las prácticas agronómicas y aumentar la productividad del cultivo de arroz de manera eficiente.

9. Referencias

- Abedin, M. Z., & Hettiaratchi, D. R. P. (2002). State parameter interpretation of cone penetration tests in agricultural soils. *Biosystems Engineering*, 83, 469–479.
- Atwell, B. J. (1990). The effect of soil compaction on wheat during early tillering. III. Fate of carbon transported to the roots. *New Phytologist*, 115(1), 43-49.
- Ball, B. C., Parker, J. P., & Scott, A. (1999). Soil and residue management effects on cropping conditions and nitrous oxide fluxes under controlled traffic in Scotland. *Soil and Tillage Research*, 52(3-4), 191-201.
- Baquero, J. E., Ammón, M. B., Contreras, S. A., & Garzón, A. S. (2012). Efectos de la compactación sobre propiedades físicas de suelos y rendimientos de cultivos. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 29(2), 42-55.
- Bayer. (2023). Cultivos arroz. Agro Bayer - Colombia. <https://www.agro.bayer.co/es-co/cultivos/arroz.html>
- Becerra, J., Ramírez, C., & López, M. (2018). *Efectos de la compactación del suelo en la productividad agrícola: Un análisis desde la geoestadística*. *Revista de Ciencias Agrarias*, 35(2), 145-162.
- Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 59-68.
- Burgos, C. (2021). Evaluación de crecimiento y rendimiento de cuatro variedades y una línea avanzada de arroz (*Oryza sativa* L.) en el centro experimental La Victoria- Fedearroz Montería-Córdoba.

- Colombi, T., Kirchgessner, N., Walter, A., & Keller, T. (2017). Root tip shape governs root elongation rate under increased soil strength. *Plant Physiology*, 174, 2289-2301.
- Cortes, C., Camacho, J., & Leiva, F. (2013). Análisis multivariado del comportamiento espacial y temporal de la resistencia del suelo a la penetración. *Acta Agronómica*, 62(3), 268-278.
- Corteva. (2024). *Compactación del suelo en la producción agrícola*. Recuperado de <https://www.corteva.es>
- Creswell, J. (2009). *Research designs: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. SAGE Publications Ltd.
- DANE. (2022). Encuesta de arroz mecanizado 2024. Recuperado de <https://www.dane.gov.co>
- DANE. (2024). Encuesta de arroz mecanizado 2024. Recuperado de <https://www.dane.gov.co>
- Esri. (2023). How IDW works. <https://pro.arcgis.com/en/proapp/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-idw-works.htm>
- Esri (2023). How Kriging works. <https://pro.arcgis.com/en/proapp/latest/tool-reference/3d-analyst/how-Kriging-works.htm>
- FAO. (2018). Soluciones para la compactación del suelo. http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/sc/soil_compaction.pdf
- FADQDI. (2018, Octubre). Protocolo de evaluación del rendimiento real (kg/ha). Fondo para financiamiento del sector agropecuario - Finagro.
- Fedearroz. (s.f.-a). Huila y Tolima zonas arroceras más competitivas ante el TLC. <https://fedearroz.com.co/es/noticias/2012/04/23/huila-y-tolima-zonas-arroceras-mas-competitivas-ante-el-tlc/>

- Fedearroz. (s.f.-b). Área, producción y rendimiento. <https://fedearroz.com.co/es/fondo-nacional-del-arroz/investigaciones-economicas/estadisticas-arroceras/area-produccion-y-rendimiento/>
- Fedearroz. (s.f.-c). Costos. <https://fedearroz.com.co/es/fondo-nacional-del-arroz/investigaciones-economicas/estadisticas-arroceras/costos/>
- Fetters, M. D., & Tajima, C. (2022). Joint displays of integrated data collection in mixed methods research. *International Journal of Qualitative Methods*, 21, 1–13.
- Gobernación de Córdoba. (2024). Plan de Desarrollo Departamental de Córdoba 2024-2027.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press.
- Grzesiak, M. T., Ostrowska, A., Hura, K., Rut, G., Janowiak, F., Rzepka, A., Hura, T., & Grzesiak, S. (2014). Interspecific differences in root architecture among maize and triticale genotypes grown under drought, waterlogging and soil compaction. *Acta Physiologiae Plantarum*, 36, 3249-3261.
- Gutiérrez, D. (2018). Compactación del suelo. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 16(1), 107-116. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v16n1a11>
- Håkansson, I., & Lipiec, J. (2000). *A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction*. *Soil & Tillage Research*, 53(2), 71-85.
- 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*, 82(2), 121-145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw Hill Interamericana Editores.
- Infobae. (2024). *Colombia se quedaría sin arroz de producción nacional en 2025*. Recuperado de <https://www.infobae.com>

- Journel, A. G., & Huijbregts, C. J. (1978). *Mining Geostatistics*. Academic Press
- Krivoruchko, K., & Gotway, C. A. (2003). Using Spatial Statistics in GIS.
- Kruger, H., Venanzi, S., & Pereira, E. (2008). Efecto del pastoreo sobre la resistencia mecánica del suelo en sistemas de producción bajo siembra directa continua. *Ciencia del Suelo*, 26(2), 211-217.
- Kuncoro, P. H., Koga, K., Satta, N., & Muto, Y. (2014). A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water II: Soil pore structure indices. *Soil and Tillage Research*, 143, 180-187. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.06.006>
- Lynch, J. P., & Wojciechowski, T. (2015). Opportunities and challenges in the subsoil: pathways to deeper rooted crops. *Journal of Experimental Botany*, 66, 2199-2210.
- Marroquin, J. M. (2018). Diagnóstico de la compactación de suelos arroceros del municipio Campoalegre - Huila [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- Medios UNNE. (2022). *Impacto de la compactación del suelo en la cosecha de maíz*. Recuperado de <https://medios.unne.edu.ar>
- Muñoz, D. A. (2016). [Tesis de Investigación]. Repositorio Universidad Nacional. https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57887/2016David_Alejandro_Mu%C3%25Boz.pdf?sequence=1
- Munyati, C., & Sinthumule, N. (2021). *Comparing Kriging and Inverse Distance Weighted interpolation methods in assessing vegetation cover change in a savanna-forest transition zone*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(1), 45-61.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. (2004). Desarrollo de la siembra directa en Brasil Tropical (147). <http://www.fao.org/docrep/007/y2638s/y2638s00.htm#Contents>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. (2004). Soluciones para la compactación del suelo. http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/sc/soil_compaction.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. (2003). Guía para identificar las limitaciones de campo en la producción de arroz. <https://www.fao.org/4/y2778s/y2778s00.htm>
- Ortiz, D., Segura, A., Chávez, J. E., Sotomayor, J. R., & Torres, E. (2011). Compactación del suelo causada por el tránsito de maquinaria agrícola en el cultivo de arroz. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 28(1), 127-137.
- Otto, R., Silva, A. P., Franco, H. C. J., Oliveira, E. C. A., & Trivelin, P. C. O. (2011). High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil and Tillage Research*, 117, 201-210.
- Pabin, J., Lipiec, J., Wlodek, S., Biskupsky, A., & Kaus, A. (1998). Critical soil bulk density and strength for pea root growth as related to other soil factors. *Soil and Tillage Research*, 43, 206-208.
- Philip, G. M., & Watson, D. F. (1985). A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation.
- Philip, G. M., & Watson, D. F. (1985). A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation.
- Ruser, R., Flessa, H., Schilling, R., Steindl, H., & Beese, F. (1998). Soil compaction and fertilization effects on nitrous oxide and methane fluxes in potato fields. *Soil Science Society of America Journal*, 62(5), 1587-1595. <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200060013x>
- Schneider, F., Don, A., Hennings, V., Schmittmann, O., & Seidel, S. J. (2017). Simulated studies on the climatic conditions favoring platy structure formation in haplic luvisol derived from loess. *Soil and Tillage Research*, 174, 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.06.001>

- SENA-FEDEARROZ. (2022). Tratamiento de la variabilidad espacial de muestras de compactación sobre los rendimientos del cultivo de arroz bajo riego utilizando la Plataforma Veris en la finca del Sena, Regional Córdoba. Revista Fedearroz, 345.
- Soane, B., Blackwell, P., Dickson, J., & Painter, D. (1981). Compaction by agricultural vehicles: a review. 1. Soil and wheel characteristics. Soil and Tillage Research, 1(1), 207-237.
- Tenza, J. (2016). Estudio de las propiedades mecánicas de suelos agrícolas a partir de pruebas in situ y de laboratorio para modelos de labranza y tracción [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- Universidad de los Andes, (2023). Introducción a la regresión lineal: definición y aplicaciones. [Introducción a la regresión lineal: definición y aplicaciones | Programas](#)
- Valdés, G., Gonzales, H., & Will, H. (2011). Compactación del suelo. En R. Ferrera-Cerrato (Ed.), Compactación de suelos agrícolas por intemperismo y uso de maquinaria (pp. 1-12). Editorial Universidad Autónoma de Nayarit.
- Veronese, J., Carvalho, M., Dafonte, J., Freddi, O., Vidal, E., & Ingaramo, O. (2006). Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian Ferralsol. Soil and Tillage Research, 85(1-2), 166-177.
- White, R., & Kirkegaard, J. (2010). The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil: implications for water uptake. Plant, Cell & Environment, 33, 133-148.

ANEXOS

A. Anexo: Álbum fotográfico del proyecto

Figura A1. *Vista panorámica del predio.*



Nota. Fotografía tomada por Alexis Meléndez en el Centro Agropecuario y de Biotecnología El Porvenir, SENA, Regional Córdoba (2024).

Figura A2. *Vista panorámica del predio.*



Nota. Fotografía tomada por Alexis Meléndez en el Centro Agropecuario y de Biotecnología El Porvenir, SENA, Regional Córdoba (2024).

Figura A3. *Vista panorámica del predio.*



Nota. Fotografía tomada por Alexis Meléndez en el Centro Agropecuario y de Biotecnología El Porvenir, SENA, Regional Córdoba (2024).

Figura A4. *Vista panorámica del predio.*



Nota. Fotografía tomada por Alexis Meléndez en el Centro Agropecuario y de Biotecnología El Porvenir, SENA, Regional Córdoba (2024).