



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS



ESCUELA DE AGRICULTURA, SILVICULTURA, PESCA Y
VETERINARIA
CARRERA DE AGROPECUARIA

TRABAJO DE TITULACIÓN

Componente práctico del Examen de carácter Complexivo,
presentado H. Consejo Directivo de la Facultad, como requisito previo
para obtener el título de:

INGENIERA AGROPECUARIA

TEMA:

“Efectos de la compactación por el laboreo intensivo de los suelos en
Ecuador, asistida por la inteligencia artificial”.

AUTORA:

Cindy Valentina Uvidia Milan

TUTORA:

Lic. Martha Viviana Uvidia Vélez, MSc.

Babahoyo - Los Ríos – Ecuador

2023

RESUMEN

La compactación del suelo es un factor importante que representa la pérdida de volumen de una determinada masa del suelo, debido a las fuerzas externas que actúan sobre el mismo; en la actividad agrícola estas fuerzas externas sobre el suelo son principalmente: Implementos de la labranza del suelo, cargas generadas por las llantas de tractores e implementos de arrastre y pisoteo de animales. La información obtenida fue recolectada a través de técnicas de análisis, síntesis y resumen, con la finalidad de que el lector conozca sobre los efectos de la compactación por el laboreo intensivo de los suelos en Ecuador, utilizando la inteligencia artificial. Por lo anteriormente detallado se determinó que los principales sistemas de labranza convencional que provocan la compactación del suelo son: labranza primaria y labranza secundaria. Existen factores que provocan la compactación tales como: Tráfico pesado, cultivo intensivo, sobrepastoreo, uso de maquinaria pesada, cambios en la estructura del suelo. Los factores asociados a la mecanización agrícola con inteligencia artificial son los siguientes: peso de la maquinaria, distribución del peso de la maquinaria, anchura de los neumáticos, presión de inflado de los neumáticos, deslizamiento de las ruedas, ritmo de trabajo, número de pasadas del equipo y profundidad de trabajo del equipo de laboreo. Las principales aplicaciones de la Inteligencia Artificial en la mecanización agrícola son las siguientes: Monitoreo del suelo, mapeo y análisis de la parcela, manejo de maquinarias agrícolas, sistema de riego y fertilización y aplicaciones de drones.

Palabras claves: Compactación del suelo, labranza, inteligencia artificial, maquinarias agrícolas.

SUMMARY

Soil compaction is an important factor that represents the loss of volume of a given soil mass, due to external forces acting on it; in agricultural activity these external forces on the soil are mainly: Soil tillage implements, loads generated by tractor tires and dragging implements and animal trampling. The information obtained was collected through the technique of analysis, synthesis and summary, with the purpose of informing the reader about the effects of compaction due to intensive soil tillage in Ecuador, using artificial intelligence. From the above, it was determined that the main conventional tillage systems that cause soil compaction are: primary tillage and secondary tillage. There are factors that cause compaction such as: heavy traffic, intensive cultivation, overgrazing, use of heavy machinery, changes in soil structure. The factors associated with agricultural mechanization with artificial intelligence are the following: weight of machinery, weight distribution of machinery, tire width, tire inflation pressure, wheel slip, work rate, number of passes of the equipment and working depth of the tillage equipment. The main applications of Artificial Intelligence in agricultural mechanization are the following: Soil monitoring, Plot mapping and analysis, Farm machinery management, Irrigation and fertilization system and drone applications.

Key words: Soil compaction, tillage, artificial intelligence, agricultural machinery.

INDICE

RESUMEN	II
SUMMARY	III
1. CONTEXUALIZACIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3. JUSTIFICACIÓN	4
1.4. OBJETIVOS	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. Línea de investigación.....	6
2. DESARROLLO.....	7
2.1. MARCO CONCEPTUAL.....	7
2.1.1. Labranza del suelo.....	7
2.1.2. Compactación del suelo	8
2.1.2.1. Impacto de la compactación del suelo	9
2.1.3. Principales labores intensivas que causan la compactación de los suelos. 10	
2.1.3.1. Labranza primaria.....	10
2.1.3.2. Labranza secundaria	10
2.1.4. Factores asociados a la mecanización agrícola con inteligencia artificial sobre la compactación del suelo	11
2.1.5. Principales efectos de la compactación por el laboreo intensivo de los suelos, utilizando la inteligencia artificial.	12
2.1.6. Inteligencia artificial.....	13
2.1.6.1. Los procedimientos básicos de la inteligencia artificial	13
2.1.6.2. Principales aplicaciones de la Inteligencia Artificial en la mecanización agrícola	14
2.1.6.2.1. Monitoreo del suelo	14
2.1.6.2.2. Mapeo y análisis de la parcela.....	15
2.1.6.2.3. Manejo de maquinaria agrícola.....	15
2.1.6.2.4. Sistemas de riego y fertilización	15
2.1.6.2.5. Aplicación de Drones.....	16
2.1.7. Efectos de la Inteligencia Artificial sobre la compactación del suelo.....	16
2.1.8. Medidas para evitar la compactación del suelo	17
2.2. MARCO METODOLÓGICO	18

2.3.	Resultados	19
2.4.	Discusión de resultados	20
3.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	21
3.1.	Conclusiones.....	21
3.2.	Recomendaciones.....	22
4.	REFERENCIAS Y ANEXOS.....	23
4.1.	Referencias	23
4.2.	Anexos	27

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Laboreo del suelo con maquinaria agrícola con inteligencia artificial.....	28
Figura 2. Compactación del suelo por el uso de maquinaria agrícola con inteligencia artificial.....	28
Figura 3. Conducción automatizada con GPS.....	29
Figura 4. Laboreo del suelo con equipos acoplados de robots inteligentes.....	29

1. CONTEXUALIZACIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial uno de los problemas medioambientales más importantes es la degradación del suelo y la principal amenaza para la sostenibilidad y el mantenimiento de la capacidad productiva de los suelos. El laboreo intensivo en los suelos agrícolas favorece la destrucción de la estructura, pérdida de materia orgánica, compactación y emisión de CO² a la atmosfera (Navarro *et al.* 2018).

La compactación del suelo ocasiona el desgaste de rendimiento en la producción de cultivos mediante la restricción de crecimiento de las raíces y la reducción de la circulación del aire y el agua en el suelo (López *et al.* 2018).

El laboreo intensivo provoca modificaciones específicas de las propiedades físicas de los suelos afectando directamente su fertilidad; esta alteración incide directamente sobre la estructura de los horizontes superficiales influyendo en el comportamiento hídrico de los mismos, dando origen a la compactación del suelo (López *et al.* 2018).

La compactación del suelo es un factor significativo que representa la pérdida de volumen de una determinada masa del suelo, debido a las fuerzas externas que actúan sobre el mismo; en la actividad agrícola estas fuerzas externas sobre el suelo son principalmente: Implementos de la labranza del suelo, cargas generadas por las llantas de tractores e implementos de arrastre y pisoteo de animales (Pioneer 2019).

Existen suelos que bajo condiciones naturales pueden presentar horizontes con diferentes grados de compactación a menor escala, pero esto puede cambiar debido a la aplicación intensiva del laboreo del suelo, lo cual llega a producir serios problemas en el desarrollo de las plantas y en la producción (Gómez *et al.* 2018).

La compactación del suelo es un problema común en la agricultura y es causada principalmente por el laboreo intensivo de los suelos. Esto puede tener un impacto negativo en la calidad del suelo, afectando la capacidad del suelo para retener nutrientes y agua, lo que a su vez puede reducir la productividad del cultivo. En Ecuador, la agricultura es una importante fuente de ingresos y empleo, y la compactación del suelo es un problema común que afecta la productividad y la rentabilidad de los agricultores.

Afortunadamente, la inteligencia artificial (IA) ofrece nuevas oportunidades para abordar este problema y mejorar la gestión del suelo en la agricultura. La IA puede ser utilizada para analizar la calidad del suelo, medir la compactación del suelo en tiempo real y proporcionar recomendaciones precisas para el manejo del suelo. Esto puede ayudar a los agricultores a maximizar la productividad del cultivo y minimizar los efectos negativos de la compactación del suelo en el largo plazo.

En este sentido, esta investigación se enfocó en determinar los principales efectos de la compactación por el laboreo intensivo de los suelos en Ecuador, asistida por la inteligencia artificial, con el objetivo de proporcionar información valiosa para mejorar la gestión del suelo en la agricultura.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La disminución de los rendimientos en los cultivos ha tenido un mayor crecimiento debido a la degradación de los suelos, a la sobreexplotación, deforestación, y aplicación de sistemas convencionales de maquinarias agrícola con un exceso laboreo intensivo de los suelos.

El laboreo intensivo del suelo con implementos convencionales, es una práctica agrícola que ha sido identificada como una de las principales causas de la compactación del suelo. Por lo tanto, es difícil establecer métodos tecnificados adecuados de labranza en una zona para los suelos, debido a varios factores que deben ser estudiados.

La problemática importante en los suelos es la compactación, la misma que provoca la pérdida de rendimiento en la producción de cultivos mediante la restricción de crecimiento de las raíces, la reducción de la circulación del aire y el agua en el suelo.

Además, la falta de información precisa sobre los efectos de la compactación del suelo en la calidad del suelo y la productividad del cultivo puede dificultar la toma de decisiones sobre el manejo del suelo en la agricultura. Por lo tanto, es necesario determinar los principales efectos de la compactación por el laboreo intensivo de los suelos en Ecuador, asistida por la inteligencia artificial, para proporcionar información valiosa para mejorar la gestión del suelo en la agricultura.

La inteligencia artificial ofrece nuevas oportunidades para abordar este problema, ya que puede ser utilizada para analizar la calidad del suelo, medir la compactación del suelo en tiempo real y proporcionar recomendaciones precisas para el manejo del suelo.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Es importante recalcar que las diferentes actividades agrícolas que se realizan en el recurso suelo, conllevan a la aplicación de sistemas de labranza intensiva que provocan la compactación del suelo, limitando el adecuado desarrollo y producción de los cultivos.

La compactación del suelo es un problema que puede ser minimizado aplicando algunas técnicas de corrección, aunque existe el riesgo de recompactar el suelo quedando en un nivel de mayor degradación.

Por ende, el uso de la inteligencia artificial debe ser aplicada de forma correcta en la mecanización de suelos para mitigar la compactación, debido al laboreo intensivo, lo cual permitirá mejorar los sistemas de producción de los cultivos.

Por lo expuesto se justifica que esta investigación es importante porque ayudará a mejorar la gestión del suelo en la agricultura en Ecuador, proporcionando información valiosa sobre los efectos de la compactación por el laboreo intensivo de los suelos asistida por la inteligencia artificial.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Describir los efectos de la compactación por el laboreo intensivo de los suelos en Ecuador, utilizando la inteligencia artificial.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar las principales labores intensivas que causan la compactación de los suelos.
- Determinar los principales efectos de la compactación por el laboreo intensivo de los suelos, utilizando la inteligencia artificial.

1.5. Línea de investigación

Dominio: Recursos Agropecuarios, ambiente, biodiversidad y biotecnología

Línea: Desarrollo agropecuario, agroindustrial sostenible y sustentable, biotecnología vegetal y animal.

Sublíneas: Agricultura sostenible y sustentable

2. DESARROLLO

2.1. MARCO CONCEPTUAL

2.1.1. Labranza del suelo

El laboreo tradicional del suelo ha aumentado las superficies de siembra debido al mayor rendimiento de la labranza; sin embargo, bajo situaciones perjudiciales, ha contribuido a la degradación del suelo, siendo la capa arable la máxima afectada, considerando que el 80% de los suelos agrícolas del mundo presenten una erosión de ligera a severa y un 10% una erosión de ligera a moderada (López *et al.* 2018).

El laboreo convencional tiende a aumentar gradualmente el desplazamiento y la densidad de los suelos, lo que se traduce en condensación, desestructuración y aumento de la erosionabilidad, en relación a las prácticas agrícolas de nivelación, laboreo y maquinaria agrícola pesada con inteligencia artificial en condiciones de humedad excesiva (Agüero y Alvarado 2020).

El laboreo del suelo con aperos convencionales (arados de discos o arados de vertedera) es una práctica agrícola que provoca la compactación del suelo y pérdida de humedad; por lo tanto, es muy difícil basarse en estrategias de labranza para los suelos, debido a la relación directa con las situaciones climáticas y socioeconómicas de las zonas agrícolas (López 2019).

El no laboreo o la siembra directa implican la eliminación de los residuos de los cultivos, lo que mejora la incorporación de los restos naturales, pero aumenta la densidad del suelo y, por tanto, la compactación de las capas superiores del suelo, produce un efecto negativo sobre la germinación de las semillas (Pionner 2019).

Los efectos de la compactación del suelo en la agricultura siguen provocando una disminución de la productividad, un aumento considerable de los costos de producción y una mayor erosionabilidad del suelo; esto ha creado la

necesidad de introducir nuevos implementos de maquinaria agrícola de alto valor, como el subsolado, para ayudar a contrarrestar la compactación provocada (Pionner 2019).

2.1.2. Compactación del suelo

La compactación del suelo se define como la pérdida de volumen de una determinada masa de suelo debido a las fuerzas externas que actúan sobre él; en situaciones naturales (sin intervención antrópica), pueden existir en el suelo horizontes con niveles de compactación; sin embargo, bajo condiciones de uso agrícola este fenómeno se extiende y puede causar serios problemas dentro del desarrollo de una especie cultivada (Agüero y Alvarado 2020).

Agüero y Alvarado (2020), expresan que los principales factores que inciden en la compactación son:

- Utilización de maquinaria agrícola de laboreo del suelo.
- Cargas producidas por los neumáticos de tractores y aperos de arrastre.
- Pisoteo animal.

El efecto de la compactación más importante es el cambio de porosidad; al aumentar la compactación, disminuye el área porosa, que es ocupada por aire y agua útil; la infiltración también se ve afectada porque disminuye la permeabilidad de la capa compactada; existiendo un aumento de la escorrentía, erosión y problemas de encharcamiento al disminuir la tasa de infiltración (Blanco 2019).

De los tres factores más importantes que afectan a la compactación del suelo, se debe tomar mayor atención a la compactación causada por el uso de maquinaria agrícola; las enormes superficies cultivadas han llevado a los fabricantes de equipos agrícolas a tener la aspiración de aplicar maquinarias cada vez más grandes y con mayor potencial de rodadura, sin prestar atención la fuerza que ejerce el uso de los neumáticos en varios sitios del suelo donde se utilizan dichos implementos (Blanco 2019).

2.1.2.1. Impacto de la compactación del suelo

La estructura correcta del suelo se compone de un 50% de tierra, un 25% de agua y un 25 % de espacio de aire; la compactación del suelo modifica estas proporciones produciendo un aumento en su densidad aparente, resistencia mecánica, destruyendo y debilitando su estructura; todo ello reduce la porosidad total y la macroporosidad del suelo (Roció del Bosque 2019).

En el suelo las raíces necesitan agua y oxígeno para desarrollarse, debe haber un espacio poroso adecuado en el suelo a través del cual puedan crecer; la dificultad fundamental con el que puede tropezar la raíz es el impedimento mecánico que puede corresponder a la presencia de rocas u horizontes muy pedregosos a poca profundidad; además de la presencia de capas de suelo endurecidas o compactadas debido al uso de maquinaria agrícola (Bonilla *et al.* 2021).

A medida que aumenta la densidad del suelo, el crecimiento de las raíces requiere más espacios porosos, pudiendo verse completamente impedida si la compactación es excesiva (FAO 2021).

El incremento de la resistencia mecánica del suelo limita el crecimiento de las raíces a espacios de menor resistencia, ubicado entre estructuras (terrones), en cavidades formadas con la ayuda de la fauna del suelo (lombrices) y en espacios producidos mediante la descomposición de partículas orgánicas (raíces muertas); este escenario produce una muestra característica de raíces aplanadas, colocadas en fisuras del suelo, con escasa exploración de todo el volumen (Haro 2019).

La menor macroporosidad del suelo produce una baja capacidad de aireación y oxigenación del suelo, con el fin de generar una menor actividad de las raíces y, en consecuencia, un mínimo aumento del volumen de las raíces y una menor absorción de agua y nutrientes (Haro 2019).

El resultado final de la compactación del suelo es menor en capacidad de rendimiento en la producción de cultivos; la pérdida de rendimiento puede variar ampliamente dependiendo del volumen de la compactación del suelo y las situaciones ambientales que afectan al cultivo (Bonilla *et al.* 2021).

Las situaciones favorables para el cultivo, junto con las precipitaciones oportunas y la mayor fertilidad, pueden disminuir las consecuencias de la compactación; teniendo en consideración que una compactación severa puede provocar una falta de rendimiento hasta el 60%, sin embargo, se prevé que, la compactación reduce la capacidad de rendimiento entre un 10 o 20% (López 2020).

2.1.3. Principales labores intensivas que causan la compactación de los suelos.

Dentro de los sistemas de labranza mecanizada que causan la compactación de los suelos están las siguientes:

2.1.3.1. Labranza primaria

Es un sistema de labranza mecanizada que ejerce una acción física – mecánica aplicada sobre el suelo para roturarlo; los implementos o equipos que se emplean para esta labranza son los siguientes: arado de vertedera, arado de discos, arado de cincel, arado rotativo y arado subsolador (Aldaz 2021).

La labranza primaria en condiciones desfavorables ha contribuido con la degradación de los suelos, siendo la capa arable la mas afectada, producto de la compactación del suelo.

2.1.3.2. Labranza secundaria

Es un sistema de labranza que comprende operaciones superficiales aplicadas al suelo a una profundidad de 10 cm, misma que se realiza después de

la aradura, previo y posterior a la siembra; se disgregan los terrones y se nivelan los suelos (Agüero y Alvarado 2020).

Los implementos o equipos que se utilizan para la labranza secundaria son los siguientes: rastra de clavos, rastra de cuerpos articulados, rastra combinada, rotofreseedora, rodillo liso o coarrugado, rodillo compactador y rastra de madera (Ribes 2021).

En el suelo el principal efecto de la labranza secundaria es sobre la porosidad; influye gravemente en los macroporos, que son los responsables de facilitar un movimiento adecuado del agua infiltrada a través del perfil, el intercambio de gases y ofrecer espacio suficiente para el crecimiento de las raíces (Navarro *et al* 2018).

2.1.4. Factores asociados a la mecanización agrícola con inteligencia artificial sobre la compactación del suelo

Blanco (2019) describe que existen factores que pueden aumentar la compactación del suelo y que deben ser considerados en la utilización de maquinarias agrícolas mediante la inteligencia artificial tales como:

- El peso de la maquinaria es un factor importante que cuanto mayor sea la carga del equipo, mayor será la posibilidad de comprimir el suelo y mayor la intensidad que puede alcanzar la compactación (Ribes 2021).
- La distribución del peso de la maquinaria refleja que, si la carga de la maquinaria no es uniforme, provoca un efecto negativo en el suelo como la compactación; por ejemplo, peso extra sobre las ruedas traseras, el esfuerzo ejercido con la ayuda de las ruedas traseras sobre el suelo puede ser extra (Ribes 2021).

- La anchura de los neumáticos refleja que si la carga de la maquinaria se distribuye sobre una superficie mayor (neumáticos más anchos), el esfuerzo ejercido sobre el suelo puede ser mucho menor que en el caso de utilizar neumáticos más estrechos (Valdez *et al.* 2019).
- La presión de inflado de los neumáticos refleja que cuanto más inflados estén los neumáticos, menor será la superficie del neumático en contacto con el suelo y mejor será la presión sobre el suelo; por lo tanto, se recomienda inflar con presiones de inflado bajas (Valdez *et al.* 2019).
- El deslizamiento de las ruedas detalla que cuanto mayor sea este fenómeno, mayor será la tensión en el suelo; se sugiere realizar el trabajo evitando el derrape y patinaje de los neumáticos.
- El ritmo de trabajo refleja que cuando la tensión en el suelo se mantiene durante un período prolongado de tiempo, el fenómeno de compactación tiene mayor oportunidad de generarse (Haro 2019).
- El número de pasadas del equipo refleja que cuanto mayor sea la variedad de pasadas, mayor será la compactación producida en el suelo.
- La profundidad de trabajo del equipo de laboreo representa que la parte inferior de cualquier equipo de laboreo ejercerá un esfuerzo vertical sobre el suelo, por lo que mantener la misma profundidad de laboreo producirá la compactación del suelo por debajo de esta intensidad (pie de arado), por lo que es muy beneficioso variar la profundidad de laboreo (Navarro *et al* 2019).

2.1.5. Principales efectos de la compactación por el laboreo intensivo de los suelos, utilizando la inteligencia artificial.

Actualmente existen operadores y productores que desconocen las ventajas y desventajas de la inteligencia artificial en las maquinarias agrícolas para el laboreo del suelo, lo cual ha provocado que se generen serios problemas en su

aplicación en actividades de laboreo del suelo, reflejándose en problemas de compactación, en la cual se describen sus principales efectos:

- Aumento de la densidad (densidad aparente) del suelo.
- Aumento de la resistencia mecánica del suelo.
- Destrucción y debilitación de la estructura del suelo.
- Reducción de la porosidad total del suelo.
- Menor capacidad de rendimiento en la producción de cultivos.

2.1.6. Inteligencia artificial

En el sector de las llamadas ciencias de la computación o informática, existen diversas definiciones de inteligencia artificial; la inteligencia artificial aplicada a la agricultura o ciber agricultura este obtiene datos de sensores, equipos agrícolas, imágenes de tv por satélite para pc, drones, teléfonos inteligentes, alertas por radio, LORA (Long Range) y los convierte en datos útiles (Medina 2019).

2.1.6.1. Los procedimientos básicos de la inteligencia artificial

La inteligencia Artificial tiende a desarrollar sistemas informáticos con una capacidad de razonamiento o discernimiento similar a la de la inteligencia humana; a pesar de la expectación que esta disciplina, cuya capacidad de desarrollo y eficacia se considera imposible de resistir en muchos campos (Gómez 2019).

El inicio para el perfeccionamiento de la Inteligencia Artificial, se ha basado totalmente en dotar a los ordenadores informáticos del potencial para resolver problemas de forma eficaz, probándose dos métodos viables o procedimientos preferentes: los algoritmos y las respuestas heurísticas (Gómez 2019).

El diseño de una máquina agrícola con inteligencia artificial normalmente exige el uso de equipos de disciplinas muy específicas que incluyen el cálculo numérico, la tecnología de ordenadores portátiles, el procesamiento de signos, la manipulación automatizada, la robótica o la neurociencia (Melgar 2020).

Una máquina agrícola con inteligencia artificial requiere una colección finita de instrucciones que especifique los diferentes movimientos que el ordenador ejecuta para solucionar un determinado problema (Melgar 2020).

Las estructuras de la inteligencia artificial (IA) en las maquinarias agrícolas resuelven los problemas de forma eficaz mediante un método de ensayo y error que lleva registros aplicables basados principalmente en conocimientos previos; en un dispositivo de IA, los comandos básicos son los de un PC, programa aritmético y las operaciones secuenciales de control de waft; en muchos casos, las estructuras de IA constan de niveles, un primer segmento de aprendizaje y una segunda fase de predicción (Berbel 2019).

2.1.6.2. Principales aplicaciones de la Inteligencia Artificial en la mecanización agrícola

La inteligencia artificial (IA) tiene varias aplicaciones en la mecanización agrícola que pueden tener efectos significativos en la compactación del suelo; algunas de estas aplicaciones son:

2.1.6.2.1. Monitoreo del suelo

La IA puede ser utilizada para monitorear la calidad del suelo y la compactación en tiempo real, lo que permite a los agricultores tomar medidas oportunas para prevenir y corregir la compactación del suelo.

Mediante la inteligencia artificial se puede emplear un modelo computacional para la estimación de la densidad de suelo a través del sensoramiento continuo que permite determinar la compactación del suelo y, por ende, tomar medidas preventivas y correctivas en las zonas detectadas (Gutiérrez 2019).

2.1.6.2.2. Mapeo y análisis de la parcela

La IA puede ser utilizada para mapear y analizar la parcela, proporcionando información valiosa sobre la calidad del suelo, la topografía y otros factores que pueden influir en la compactación del suelo.

En el mapeo y análisis de parcela es primordial utilizar GPS, debido a su importancia en ubicar la dirección correcta en software permitiendo elaborar mapas de suelos a base de información satelital, de forma rápida y segura, lo cual contribuye al estudio de los suelos que estén en proceso formación o degradación como el caso de la compactación del suelo (Mendoza 2021).

2.1.6.2.3. Manejo de maquinaria agrícola

La IA puede ser utilizada para controlar y optimizar el manejo de la maquinaria agrícola, lo que puede reducir la compactación del suelo durante el proceso de labranza, siembra y aplicación de insumos agrícolas.

La compactación del suelo por el tráfico con altas cargas de la maquinaria agrícola muestra una clara inclinación sobre el incremento de la potencia y tamaño de los equipos y maquinas, en la cual la inteligencia artificial por medio de la conducción autónoma y robots inteligentes pueden controlar y mejorar el manejo de la maquinaria agrícola, reduciendo los problemas de compactación del suelo en los sistemas de laboreo del suelo (Martiren *et al.* 2018).

2.1.6.2.4. Sistemas de riego y fertilización

La IA puede ser utilizada para controlar y optimizar los sistemas de riego y fertilización, lo que puede mejorar la calidad del suelo y reducir la compactación del suelo.

Los sistemas de riego y programas de fertilización son factores importantes para mejorar los rendimientos de los cultivos, por ende, la inteligencia artificial es una alternativa eficaz que permite aplicar una agricultura de precisión sustentable,

reduciendo los riegos de compactación y degradación de los suelos (Sepulveda 2020).

2.1.6.2.5. Aplicación de Drones

Los drones son herramientas tecnológicas que se utilizan para el mapeo de campos agrícolas, vigilancia y monitoreo de cultivos, plagas y enfermedades, irrigación eficiente, aplicación de productos de forma segura, reduciendo el riesgo de contaminación y evitando la compactación del suelo (Berrio *et al.* 2019).

El uso de los drones en el sector agrícola brinda la posibilidad de acceder a datos de calidad en tiempo real, lo que permite tomar decisiones en los sistemas de producción agrícolas siendo mas sustentables y eficientes (Berrio *et al.* 2019).

Para minimizar los riegos y aprovechar el potencial de los drones los pilotos deben estar capacitados para su manejo, en la cual esta tecnologia permite lograr efectos positivos en los sistemas de producción agrícola tales como: reducir la compactación y degradación del suelo, uso eficiente de insumos agrícolas, monitoreo y control de plagas y enfermedades (Robles *et al.* 2020).

2.1.7. Efectos de la Inteligencia Artificial sobre la compactación del suelo

Los efectos de la IA en la compactación del suelo pueden ser positivos si se utiliza de manera adecuada. Por ejemplo, la monitorización en tiempo real del suelo puede alertar a los agricultores sobre la necesidad de reducir la velocidad de la maquinaria agrícola para evitar la compactación del suelo; de manera similar, el mapeo y análisis de la parcela puede ayudar a los agricultores a identificar las zonas de la parcela donde se necesita una labranza más ligera para reducir la compactación del suelo (Berbel 2019).

Por otro lado, el uso inadecuado de la IA en la mecanización agrícola puede tener efectos negativos en la compactación del suelo. Por ejemplo, si se utiliza una maquinaria agrícola demasiado pesada o si se utiliza una labranza demasiado intensa, esto puede aumentar la compactación del suelo y disminuir la calidad del suelo. Por lo tanto, es importante utilizar la IA de manera adecuada y responsable para maximizar sus efectos positivos en la gestión del suelo (Rodríguez 2020).

2.1.8. Medidas para evitar la compactación del suelo

La incorporación de materia orgánica al suelo actúa de forma directa e indirecta para favorecer la formación y la estabilidad de la estructura del suelo, lo que previene la compactación; al igual que el uso de cubiertas vegetales permite la penetración de las raíces y producen poros continuos que ayudan al movimiento del aire y el agua dentro del suelo (Rodríguez *et al.* 2020).

El uso de caballones para las orugas de los tractores permite el paso de las ruedas de la maquinaria, evitando que el efecto de la compactación alcance mayor profundidad (Riquelme *et al.* 2021).

Mediante el uso de carriles distintivos para el tráfico de equipos, se puede evitar el paso inútil de equipos por el suelo, manteniendo la maquinaria en una misma dirección, para reducir el área usada por las ruedas de la maquinaria (FAO 2021).

Para hacer frente al problema de la compactación, se pueden tomar medidas correctivas, como en el caso del subsolado, y medidas complementarias, que no cambian rápidamente la situación actual del suelo, pero ayudan a mejorar el rendimiento de los cultivos o tienen un impacto en el suelo a medio o largo plazo (Amézquita y Chávez 2021).

El subsolado consiste en aflojar el suelo por debajo de la profundidad de cultivo, mediante el uso de un arado con una o más palmas inflexibles, con el objetivo de romper las capas de suelo compactado; los subsoladores suelen llegar a profundidades de 30-70 cm; también existe la posibilidad de utilizar algún tipo de arado de vertedera, ya que la capacidad de profundización es menor (Amézquita y Chávez 2021).

El subsolado es una operación costosa que sólo debe realizarse cuando las características del suelo lo justifiquen; por lo tanto, antes de tomar la decisión de realizar este trabajo, el perfil del suelo debe ser estudiado cuidadosamente, determinando la presencia de estratos de suelo compactado, estudiando su lugar y distribución espacial (Medina 2019).

2.2. MARCO METODOLÓGICO

Para la elaboración del documento se recopiló información de textos actualizados, revistas, bibliotecas virtuales y artículos científicos que contribuyeron al desarrollo del presente documento como componente práctico del trabajo de titulación.

La información obtenida fue parafraseada, resumida y analizada con la finalidad de que el lector conozca sobre los efectos de la compactación por el laboreo intensivo de los suelos en Ecuador, utilizando la inteligencia artificial.

2.3. Resultados

La labranza primaria en condiciones desfavorables ha contribuido con la degradación de los suelos, siendo la capa arable la más afectada, producto de la compactación del suelo.

En el suelo el principal efecto de la labranza secundaria es sobre la porosidad; influye gravemente en los macroporos, que son los responsables de facilitar un movimiento adecuado del agua infiltrada a través del perfil, el intercambio de gases y ofrecer espacio suficiente para el crecimiento de las raíces

El principal efecto de la labranza convencional (primaria y secundaria) sobre el suelo es aumentar gradualmente el desplazamiento y la densidad de los suelos, lo que se traduce en compactación, desestructuración y aumento de la erosionabilidad, en particular en las prácticas agrícolas de nivelación, laboreo y visitas de maquinaria pesada en condiciones de humedad excesiva.

El factor más importante que afecta a la compactación del suelo es la causada por el uso de maquinaria agrícola; las enormes superficies cultivadas han llevado a los fabricantes y productores de equipos agrícolas a tener el deseo de aplicar máquinas cada vez más grandes y con mayor potencial de rodadura, sin prestar atención al esfuerzo multiplicado que ejerce el uso de los neumáticos en los sitios de las masas donde se utilizan dichos implementos.

Una maquinaria agrícola con inteligencia artificial requiere una colección finita de instrucciones que especifique los diferentes movimientos que el ordenador ejecuta para remediar un determinado problema; esta secuencia de instrucciones constituye la forma algorítmica de la máquina de inteligencia artificial.

2.4. Discusión de resultados

Es importante que en las zonas de producción de cultivos de extensión, se establezca un manejo adecuado del uso de las maquinarias agrícolas en la preparación de los suelos con la utilización de la inteligencia artificial, para evitar la compactación del suelo, mismo que es un fenómeno difícil y costoso de corregir, de modo que no alcance niveles que restrinjan la capacidad productiva de las especies cultivadas; también hay que tener en cuenta que, aunque el problema se pueda disminuir con algunas medidas correctoras, se puede correr el riesgo de recompactar el suelo, quedando en una fase de mayor degradación (Ribes 2021).

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1. Conclusiones

Mediante la información analizada se presentan las siguientes conclusiones:

- Los principales sistemas de labranza convencional que provocan la compactación del suelo son: labranza primaria y labranza secundaria.
- Existen factores que provocan la compactación tales como: utilización de implementos de laboreo del suelo, cargas producidas por los neumáticos de tractores y aperos de arrastre y pisoteo animal.
- Los factores asociados a la mecanización agrícola con inteligencia artificial son los siguientes: peso de la maquinaria, distribución del peso de la maquinaria, anchura de los neumáticos, presión de inflado de los neumáticos, deslizamiento de las ruedas, ritmo de trabajo, número de pasadas del equipo y profundidad de trabajo del equipo de laboreo.
- Las principales aplicaciones de la Inteligencia Artificial en la mecanización agrícola son las siguientes: Agricultura 4.0, conducción autónoma (GPS), robots inteligentes y drones.
- La Inteligencia Artificial en la mecanización agrícola ofrece efectos positivos en el laboreo del suelo, debido a su eficacia en su programación y aplicación, lo que reduce la compactación del suelo.

3.2. Recomendaciones

De acuerdo a lo detallado anteriormente se recomienda lo siguiente:

- Establecer un manejo adecuado de las maquinarias agrícolas con inteligencia artificial para realizar el laboreo del suelo, evitando la compactación del mismo.
- Evitar la intensificación de la labranza convencional mediante maquinarias agrícolas con inteligencia artificial dentro del proceso productivo de un cultivo de importancia económica.
- Aplicar la inteligencia artificial como un medio sostenible en el manejo de las maquinarias agrícolas para realizar el laboreo del suelo.
- Implementar programas de capacitación sobre el uso y aplicación de maquinarias agrícolas con inteligencia artificial.

4. REFERENCIAS Y ANEXOS

4.1. Referencias

Agüero, J., Alvarado, A. 2020. Compactación y compactabilidad de suelos agrícolas y ganaderos de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarrica* 7(1):27-33.
https://www.mag.go.cr/rev_agr/v07n1-2_027.pdf

Amézquita, C., Chávez, O. 2021. La compactación del suelo y sus efectos en la productividad de los suelos. Congreso Costarricense de la ciencia del suelo, San José, Costa Rica.

Aldaz, K. 2021. Compactación de suelos, su prevención y manejo. *Boletín Técnico*. Consultado 08 ene. 2023. Disponible en:
<https://www.redalyc.org/pdf/573/57318107.pdf>

Blanco, S. 2019. La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia* 43(3):231-239.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952009000300002&script=sci_abstract

Bonilla, J., Dávila, F., Villa, M. 2021. Estudio del uso de técnicas de inteligencia artificial aplicadas para análisis de suelos para el sector agrícola. *Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento* 5(1): 4-19.
<http://recimundo.com/index.php/es/article/view/978>

Berbel, J. 2019. Inteligencia artificial en la agricultura: perspectivas en los sistemas expertos. Universidad de Cordova. 18 p.
https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_reas%2Fr149_02.pdf

Berrio, V., Mosquera, J., Alzate, D. 2019. Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión. *Limentech Ciencia Y Tecnología Alimentaria* 13(1): 29-40.

<https://www.researchgate.net/publication/319853440> USO DE DRONES PARA EL ANALISIS DE IMAGENES MULTIESPECTRALES EN AGRICULTURA DE PRECISION

- Berrio, V. 2018. Uso de drones como herramienta de planificación en agricultura de precisión para la detección temprana de problemas en cultivos de papa (*Solanum tuberosum*). Tesis Ing. Agr. Colombia. UNIPA. 125 p. https://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/ALIMEN/articloe/view/1647
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2021. Robótica agrícola y equipos automatizados para la producción agrícola sostenible. Gestión integrada de cultivos, Roma, FAO. N. 24. 40 p. <https://www.fao.org/3/cb2186es/cb2186es.pdf>
- Gómez, N; Villagra, K; Solorzano, M. 2018. La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria) (en línea). Tecnología en Marcha 31(1): 170-180. Consultado 08 ene. 2023. Disponible en: <https://DOI:10.18845/tm.v31i1.3506>
- Gómez, R. 2019. Inteligencia artificial en la agricultura. Universidad de Buenos Aires. 35 p. <https://www.uaa.edu.py/cdn/files/51e0d56daf8b58a97a9d80ef9a5d.pdf>
- Gutiérrez, L. 2019. Inteligencia artificial en el laboreo del suelo. INTA. 25 p. <https://intainforma.inta.gob.ar/tecnologia-argentina-el-inta-creo-un-robot-todo-terreno-para-cultivos-intensivos/>
- Haro, J. 2019. Efecto del laboreo sobre la calidad del suelo y la producción de quinua (*Chenopodium quinoa* wild), bajo dos sistemas de siembra en la parroquia Santiago de Quito, en la provincia de Chimborazo. Tesis Ing. Agr. Riobamba. Ecuador. 87 p. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3881/1/13T00801%20.pdf>

- López, W., Santos, R., López, J., Camas, R., Tasistro. 2019. Diagnóstico de la compactación en suelos cultivados con maíz en la Región Fraylesca, Chiapas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 9(1): 1-15. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342018000100065
- López, R. 2020. Laboreo de Conservación: Efectos a Corto y Largo Plazo sobre la Calidad del Suelo y el Desarrollo de los Cultivos. Tesis PhD. Sevilla. España. 188 p. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/52891/1/Laboreo%20de%20conservaci%C3%B3n.%20Efectos%20a%20corto%20y%20largo%20plazo%20sobre%20la%20calidad.pdf>
- López, W; Reynoso, R; López, J; Camas, R; Tasistro, A. 2018. Diagnóstico de la compactación en suelos cultivados con maíz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 9(1): 65-79. Consultado 08 ene. 2023. Disponible en: <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i1.848>
- Martiren, V., Fonterosa, R., Lastra, X., Botta, G. 2018. Compactacion por el trafico de la maquinaria agrícola: su efecto sobre el esfuerzo cortante del suelo y el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mayz* L.). In *Siembra* 3(1): 21-36. <https://doi.org/10.29166/siembra.v3i1.256>
- Mendoza, M. 2021. Estudio sobre el mapeo digital del suelo como herramienta informática para la evaluación y diagnóstico de cultivos agrícolas. Tesis Ing Sist. El Triunfo. Ecuador. UAE. 87 p. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/MENDOZA%20VACACELA%20MARIA%20ELIZABETH.pdf>
- Medina, C. 2019. Efectos de la compactación de suelos por el pisoteo de animales, en la productividad de los suelos. *Remediaciones. Revista Colombiana de Ciencia Animal* 8(1): 88-93. [file:///C:/Users/hp/Downloads/admin,+reciav8n1a13%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/hp/Downloads/admin,+reciav8n1a13%20(2).pdf)

- Melgar, M. 2020. Inteligencia artificial aplicada a la agricultura. CENGICAÑA. 5 p.
<https://cengicana.org/files/20210730085600655.pdf>
- Navarro, A; Figueroa, B; Ordaz, V; González, F. 2018. Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol (en línea). Terra Latinoamericana 18(1): 61-69. Consultado 08 ene. 2023.
Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/573/57318107.pdf>
- Navarro, A., Figueroa, B., González, F. 2019. Labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo de gramíneas y leguminosas. Terra Latinoamericana 19(2): 41-56.
<https://www.redalyc.org/pdf/573/57318107.pdf>
- Pioneer. 2019. Compactación del suelo (en línea). Boletín Técnico Pioneer. Consultado 08 ene. 2023. Disponible en: https://www.pioneer.com/CMRoot/International/Argentina/productos_y_servicios/Boletin_Compactacion_de_suelo.pdf
- Ribes, M. 2021. Estudio de la compactación de los suelos sometidos a un proceso de nivelación laser. Servei de Publicacions, Universitat de Lleida. 102 p.
tesisred.net/bitstream/handle/10803/8226/mribes.pdf?sequence=137
- Recio del Bosque, P. 2019. Manual gráfico para prácticas de física de suelos. Departamento de Ciencias del Suelo. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila. México. 173 p.
<http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/3848?show=full>
- Rodríguez, A., Arcia, J., Martínez, J., García, J., Cid, C., Castro, J. 2020. Los sistemas de labranza y su influencia en las propiedades físicas del suelo. Revista Ingeniería Agrícola 5(2): 55-60.
<https://www.redalyc.org/pdf/5862/586261425010.pdf>
- Rodríguez, L. 2020. Agricultura de precisión en el mundo y en Colombia: revisión bibliográfica. Tesis Ing. Agr. Cali. UC. 73 p.

<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/id/04e7d6eb-3120-4b11-8708-de62376f1188/Agricultura-Precision-Mundo-Rodriguez-Leydi-3745-R696a.pdf>

Robles, C., Piraneque, N., Rodríguez, A. Navarro, J. 2020. Prototipo Robótico para el Monitoreo de Conductividad, Humedad y Temperatura en Suelos Agrícolas. h LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology 9(2): 29-31.https://laccei.org/LACCEI2020-VirtualEdition/work_in_progress/WP386.pdf

Riquelme, J., Carrasco, J., Valenzuela, F. 2021. Equipos de labranza para el manejo de suelos. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Boletín INIA, N° 207. 36 p. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/7335/NR37050.pdf?sequence=7&isAllowed=y>

Ramírez, I., Ruilova, B., Garzón, J. 2021. Innovación Tecnológica en el Sector Agropecuario. Universidad Técnica de Machala. Ecuador. 134 p. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/6848/1/84%20INNOVACION%20TECNOLOGICA%20EN%20EL%20SECTOR%20AGROPECUARIO.pdf>

Sepúlveda, Y. 2020. Inteligencia artificial (IA) y sus aplicaciones en la agricultura moderna. Revista Ciencia y Tecnología 8(3): 35-49. <https://10.13140/RG.2.2.17264.89603>

Valdez, N., González, L., Will, A. 2019. Estimación de la resistencia a la penetración de suelos usando redes neuronales artificiales. Acta Agronómica 5(3): 24-35.https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/28784

4.2. Anexos



Figura 1. Laboreo del suelo con maquinaria agrícola con inteligencia artificial



Figura 2. Compactación del suelo por el uso de maquinaria agrícola con inteligencia artificial



Figura 3. Conducción automatizada con GPS



Figura 4. Laboreo del suelo con equipos acoplados de robots inteligentes