

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MANEJOS EN COBERTURA EN
CÉSPED DEPORTIVO**

por

José Agustín MONZA GONZÁLEZ

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2025**

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. MSc Fernando Sganga

Tribunal:

Ing. Agr. MSc Fernando Sganga

Ing. Agr. MSc Andrés Baietto

Ing. Agr. Rafael Dodera

Fecha:

13 de febrero de 2025

Estudiante:

José Agustín Monza González

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas y entidades que hicieron posible este trabajo. Al Club Atlético Bella Vista y a sus funcionarios, por facilitar sus instalaciones con total generosidad.

A Fernando Ronca y Tesor, así como a Gustavo Perazza, por proporcionar toda la maquinaria y los materiales necesarios para llevar a cabo este proyecto, así como por su disposición y tiempo invaluable.

A la Facultad de Agronomía, por brindarme las herramientas y los recursos indispensables para mi formación, tanto personal como profesional, a lo largo de estos años. De igual manera, agradezco profundamente a los docentes que forman parte de esta institución, en especial a mi tutor, Fernando Sganga, y a Andrés Baietto, por su dedicación y acompañamiento durante este proceso.

A mis compañeros de facultad y amigos de la vida, con quienes compartí experiencias inolvidables, y de manera especial, a Matías Mañana, por su apoyo constante.

Finalmente, quiero agradecer a mis padres, quienes me inculcaron los valores que me guían, me formaron como persona y estuvieron presentes en cada momento, ayudándome a alcanzar esta meta. A mi compañera de vida, Daniella, por su apoyo incondicional y por estar a mi lado siempre, así como a su familia, que también fue parte esencial de este recorrido.

TABLA DE CONTENIDO

<u>PÁGINA DE APROBACIÓN.....</u>	<u>2</u>
<u>AGRADECIMIENTOS.....</u>	<u>3</u>
<u>LISTA DE TABLAS Y FIGURAS</u>	<u>6</u>
<u>RESUMEN.....</u>	<u>7</u>
<u>ABSTRACT.....</u>	<u>8</u>
<u>1. INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>9</u>
<u>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</u>	<u>10</u>
<u>2.1 CÉSPED; DEFINICIONES, IMPORTANCIA Y USOS PRINCIPALES.....</u>	<u>10</u>
<u>2.2 ESPECIES DE CÉSPED CON UTILIDAD DEPORTIVA</u>	<u>10</u>
<u>2.3 PRÁCTICAS AGRONÓMICAS EN CÉSPED.....</u>	<u>11</u>
<u>2.3.1 Corte de césped:.....</u>	<u>11</u>
<u>2.3.2 Riego</u>	<u>11</u>
<u>2.3.3 Fertilización.....</u>	<u>12</u>
<u>2.3.4 Control de plagas, malezas y enfermedades.....</u>	<u>12</u>
<u>2.3.5 Manejo del suelo.....</u>	<u>12</u>
<u>2.3.6 Topdressing y materiales a utilizar</u>	<u>12</u>
<u>2.4 COMPACTACIÓN.....</u>	<u>13</u>
<u>2.5 UTILIZACION DE UAV, SENSORAMIENTO REMOTO, IMÁGENES MULTIESPECTRALES, ÍNDICES ESPECTRALES.....</u>	<u>15</u>
<u>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</u>	<u>17</u>
<u>3.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO.....</u>	<u>17</u>
<u>3.2 ENSAYOS</u>	<u>19</u>
<u>3.2.1 Ensayo a campo</u>	<u>19</u>
<u>3.2.2 Bioensayo.....</u>	<u>20</u>
<u>3.3 OBTENCIÓN DE IMÁGENES.....</u>	<u>21</u>
<u>3.4 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN.....</u>	<u>21</u>
<u>3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....</u>	<u>22</u>
<u>3.5.1 Corrección por humedad.....</u>	<u>22</u>
<u>3.5.2 Análisis de RP.....</u>	<u>22</u>
<u>3.5.3 Análisis estadístico bioensayo.....</u>	<u>23</u>

<u>4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</u>	<u>24</u>
<u>4.1 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN Y CORRECCION DE RP POR CH.....</u>	<u>24</u>
<u>4.1.1 Modelos de corrección:</u>	<u>24</u>
<u>4.1.2 Dispersión de datos con y sin corrección:</u>	<u>26</u>
<u>4.2 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN.....</u>	<u>27</u>
<u>4.3 BIOENSAYO.....</u>	<u>30</u>
<u>5. CONCLUSIÓN.....</u>	<u>35</u>
<u>6. BIBLIOGRAFÍA.....</u>	<u>36</u>

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tablas

Tabla 1 <i>Descripción de suelo Formación Toledo</i>	18
Tabla 2 <i>Análisis químico de Formación Toledo</i>	18
Tabla 3 <i>Complejo de intercambio</i>	19
Tabla 4 <i>Coefficientes de determinación para los modelos de RP y DRP</i>	24
Tabla 5 <i>Análisis por tratamiento y altura</i>	32
Tabla 6 <i>Análisis químico de compost</i>	33

Figuras:

Figura 1 <i>Ubicación geográfica del Complejo Deportivo Sebastián Bauzá</i>	17
Figura 2 <i>Maquinaria y aplicación de materiales</i>	20
Figura 3 <i>Bioensayo</i>	20
Figura 4 <i>Modelo gráfico de RP y contenido de humedad</i>	25
Figura 5 <i>Modelo gráfico de DRP y contenido de humedad</i>	26
Figura 6 <i>Diagrama de dispersión comparativa de los registros de RP y RPC</i>	27
Figura 7 <i>RP de 0-5 cm</i>	28
Figura 8 <i>RP de 5-10</i>	28
Figura 9 <i>Correlación entre altura (H) e índices espectrales</i>	31
Figura 10 <i>Relación lineal entre la altura y el NDVI</i>	32

RESUMEN

Las superficies de césped deportivo, especialmente en Uruguay, juegan un rol fundamental en el fútbol, el deporte más popular del país. Sin embargo, las malas condiciones de los campos de juego afectan negativamente la calidad del espectáculo, aumentan el riesgo de lesiones y dificultan el desempeño deportivo. Los objetivos específicos fueron: (i) analizar el efecto del topdressing con arena, compost y su combinación en la compactación y resistencia a la penetración del suelo en campos deportivos, (ii) evaluar el impacto de los tratamientos sobre el crecimiento y desarrollo del césped, medido a través de variables como altura, densidad y calidad visual, medido a través del NDVI. Se implementaron ensayos de campo y bioensayos en condiciones controladas, utilizando cuatro tratamientos: arena (AA), compost (CC), mezcla de arena y compost (AC), y un testigo (T). Se midieron variables como resistencia a la penetración (RP), altura del césped e índices de vegetación (NDVI) obtenidos mediante teledetección. Los resultados indicaron que los tratamientos con compost y arena redujeron significativamente la compactación del suelo, favoreciendo el desarrollo radicular. El compost destacó por mejorar la altura y densidad del césped, gracias a su aporte de materia orgánica y nutrientes como NPK. Por otro lado, la combinación de arena y compost presentó resultados inconsistentes debido a interacciones negativas entre los materiales. Este estudio concluye que la aplicación de compost y arena mejora tanto el desarrollo del césped como las propiedades del suelo, mientras que se requiere optimizar las proporciones de mezcla para el tratamiento combinado. Se proponen futuros trabajos para determinar las combinaciones ideales que potencien la calidad del césped y su sostenibilidad.

Palabras clave: césped deportivo, topdressing, compactación del suelo, índices de vegetación, manejo agronómico

ABSTRACT

Sports turf surfaces, especially in Uruguay, play a fundamental role in football, the most popular sport in the country. However, poor playing field conditions negatively affect the quality of the performance, increase the risk of injuries and hinder sports performance. The specific objectives were: (i) to analyze the effect of topdressing with sand, compost and their combination on soil compaction and penetration resistance in sports fields, (ii) to evaluate the impact of treatments on turf growth and development, measured through variables such as height, density and visual quality, measured through NDVI. Field trials and bioassays were implemented under controlled conditions, using four treatments: sand (AA), compost (CC), a mixture of sand and compost (AC), and a control (T). Variables such as penetration resistance (RP), turf height and vegetation indices (NDVI) obtained through remote sensing were measured. The results indicated that treatments with compost and sand significantly reduced soil compaction, favoring root development. Compost stood out for improving the height and density of the turf, thanks to its contribution of organic matter and nutrients such as NPK. On the other hand, the combination of sand and compost presented inconsistent results due to negative interactions between the materials. This study concludes that the application of compost and sand improves both the development of the turf and the properties of the soil, while it is necessary to optimize the mixing proportions for the combined treatment. Future work is proposed to determine the ideal combinations that enhance the quality of the turf and its sustainability.

Keywords: turf grass, topdressing, soil compaction, vegetation indices, agronomic management

1. INTRODUCCIÓN

En general por césped se entiende que es un cultivo de gramíneas que cumplen ciertas condiciones que lo diferencian de otros cultivos semejantes, como por ejemplo una nivelación, la no presencia de plaga, enfermedades y malezas, estar sujeto a corte y una cierta "uniformidad de especies". El césped cumple determinadas funciones vinculadas a su uso, siendo uno de los más importantes el deportivo, donde la calidad de la superficie de juego aplica una serie de cuidados y mantenimiento de la superficie, implica un importante volumen de recursos y trabajo aplicado al césped.

Particularmente en Uruguay, vemos cómo influye su importancia específicamente en el fútbol, el deporte más popular del país, según Arocena et al. (2018) 74% de la población mira a la selección uruguaya ya sea por TV o internet, un 23% de la población practican este deporte de forma recreativa y 165.000 practican fútbol de forma regular, incluyendo ligas amateurs, AUF y OFI, un número que tiende a aumentar con el paso del tiempo.

Barlocco et al. (2014) explican que una demanda de campos deportivos para realizar la actividad, siendo además una demanda aún más exigente, en búsqueda de campos deportivos de buena calidad, con condiciones para el buen desarrollo del juego y a su vez, para disminuir el riesgo de lesiones, siendo el mal estado de un campo de juego una de las principales razones de lesión de los jugadores. Esta razón, determina porque la calidad del césped de las canchas de juego es de vital importancia. Bentancor Méndez et al. (2009) menciona que los clubes de fútbol habitualmente no realizan las inversiones necesarias en los campos deportivos de césped natural, lo que perjudica al juego, los jugadores (lesiones, dificultades de juego, etc.), espectadores (el espectáculo deja de ser atractivo) y la fluidez de la pelota.

Tanto Barlocco et al. (2014) como Bentancor Méndez et al. (2009) mencionan la importancia de invertir en canchas de fútbol para que sus jugadores de primera división puedan entrenar y jugar partidos como locatarios, así como la inversión en campos de concentración con instalaciones aptas para que los jugadores utilicen previo a jugar un partido. De esta forma, queda evidenciado que, para un buen desarrollo del deporte, el campo de juego es un elemento de importancia central, donde para el desarrollo de campos de juego con césped de calidad, es necesaria la realización de distintas prácticas agronómicas de mantenimiento. En este contexto, el presente trabajo busca; estudiar, analizar y concluir acerca del impacto de distintos tratamientos sobre los campos de juegos.

Particularmente, este trabajo se concentra en los efectos de la aplicación de materiales en superficie (top dressing), donde se utilizó arena y compost en diferentes combinaciones con el fin de evaluar las mejoras de las propiedades físicas y químicas en el campo de juego, enfocado en mejorar la calidad de la superficie de juego. Esto último implica mejorar el confort de los jugadores (terrenos de juegos menos compactados, mejores tramas de césped) y proporcionar un color de césped adecuado para cumplir con las exigencias de los espectadores, ya sea por medios televisivos y/o presenciales.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 CÉSPED; DEFINICIONES, IMPORTANCIA Y USOS PRINCIPALES

Autores como Álvarez (2006) y Pellegrino Beltramini (2002) definen el césped como asociaciones de plantas que comparten familias botánicas, que además se comportan de forma densa y continua sobre el suelo, y que presentan ciertas condiciones de persistencia bajo cortes y tráfcos sobre el mismo. Además, Monje Jiménez (2006) define el césped deportivo como aquel que puede soportar el pisoteo, pudiendo estar compuesto de especies como la *festuca spp*, *Cynodon spp*, *cenchrus clandestinus*, *lolium spp* entre otros.

Monje Jiménez (2006) detalla que, desde el punto de vista de sus usos, el césped aporta una utilidad estética a la visual, además de su función recreativa y deportiva, que beneficia a sectores productivos de nuestra economía. Distintos autores como Merino y Ansorena (1998), Álvarez (2006), Thomas (1976) y Parracia (2012) mencionan los diferentes beneficios del césped como el aporte significativo al cuidado del medioambiente, a partir de un control en la erosión del suelo y regulación de la temperatura, entre otros. Parracia (2012) define diferentes tipos de uso del césped entre las que se encuentran principalmente el uso residencial, espacios públicos, y el deportivo. Merino y Ansorena (1998) mencionan que, en comparación con el suelo agrícola, el campo deportivo está sometido al impacto de la actividad, por lo cual, deberá presentar condiciones que le permita cumplir con un buen desarrollo radicular y a su vez resistir la presión de los jugadores.

2.2 ESPECIES DE CÉSPED CON UTILIDAD DEPORTIVA

Según la Confederación Sudamericana de Fútbol (Conmebol, 2019), de acuerdo con la región climática, especies vegetales para la constitución del campo deportivo y el tipo de suelo donde se implementará y desarrollará el césped, se pueden definir dos tipos de asociaciones. En primer lugar, están los campos deportivos sobre climas cálidos (warm season grasses), adaptados para áreas tropicales, dónde se destaca el césped Bermuda (variedades de *Cynodon spp*). Por otro lado, para climas fríos (cool season grasses), los campos deportivos están constituidos regularmente por variedades de *Lolium*.

Concretamente en Uruguay, por la región climática en la que se encuentra, se utilizan ambos tipos. La base del campo de juego se realiza a partir de *Cynodon dactylon*, la cual se reproduce vegetativamente por medio de estolones (Monje Jiménez, 2006). Su sistema radicular es profundo, siendo una especie extremadamente rústica, además de ser capaz de colonizar cualquier tipo de suelo (Álvarez, 2006). La especie *Cynodon dactylon* requieren una alta luminosidad, no desarrollándose favorablemente bajo condiciones de sombra, es por ello por lo que la duración del período de luz influye directamente en el crecimiento (Conmebol, 2019). A su vez, tiene un crecimiento generalmente bueno en muchos tipos de suelos, desde los arcillosos a los arenosos, alcalinos o ácidos siempre que su fertilidad no esté limitada, y su crecimiento se favorece los terrenos con un buen drenaje (Álvarez, 2006). Su mayor problemática es que entra en letargo invernal cuando descienden las temperaturas y el rebrote no se produce hasta la primavera siguiente (Merino & Ansorena, 1998). Se suele utilizar el *Cynodon dactylon* en todo tipo de cubiertas, los híbridos, también llamados Bermuda, son especialmente empleados en campos de golf, cancha de tenis y campos de fútbol (Parracia, 2012).

Otras especies altamente utilizadas en países con estaciones frías son *Lolium perenne* o *Lolium multiflorum* (Conmebol, 2019), estas especies presentan

requerimientos de frío y entran al verano con buena población de macollos vegetativos. Su persistencia productiva depende del cultivar y el ambiente (Parracia, 2012). Los cultivares de *Lolium perenne* se distinguen de los tipos anuales por sus hojas más finas, macollos achatados y semillas sin aristas (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], 2010).

2.3 PRÁCTICAS AGRONÓMICAS EN CÉSPED

Valdivia (2009) y Parracia (2012) dividen las prácticas agronómicas del césped en dos etapas, la primera etapa, conlleva un acondicionamiento del suelo y elección adecuada de la o las especies a implantar. En la segunda etapa se realizan una serie de prácticas para realizar el mantenimiento (corte, riego, entre otras) del césped acorde a los objetivos previamente establecidos.

Merino y Ansorena (1998) mencionan que la superficie original del sitio fue modificada mediante desmontes, rellenos, movimientos de tierras y aportes de materiales como tierras, arenas, gravas, enmiendas orgánicas entre otros materiales con el fin de mejorar el mismo. Para un correcto desarrollo vegetal y mantenimiento estético del césped, se deben llevar a cabo distintas prácticas. Varios autores como Álvarez (2006), Pellegrino Beltramini (2002), Monje Jiménez (2006) y Merino y Ansorena (1998) enumeran las actividades esenciales a realizar una vez instalado y establecido el césped. Entre ellas, estos autores mencionan actividades de mantenimiento como corte riego, fertilización, control de plagas, enfermedades y malezas. Por otro lado, citan numerosos manejos del suelo como aireación, top dressing, etc.

2.3.1 Corte de césped:

Esta práctica además de contar con un fin estético, tiene implicancia en el desarrollo del césped, al reducir la pérdida de agua por parte de este por una reducción del área foliar, así como provocar una mayor densidad (Monje Jiménez, 2006). La altura y frecuencia de corte son dos aspectos esenciales para un correcto desarrollo del césped, tanto la Conmebol (2019) como la Federación Internacional de Fútbol Asociación (FIFA, 2023) establecen alturas de cortes no superiores a 30mm, y una frecuencia de corte donde no se debe superar más de 1/3 de la altura de este.

Ambas instituciones Conmebol (2019) y FIFA (2023) también diferencian los tipos de corte según su utilidad. El corte helicoidal da un mejor acabado a la cancha y es la tarea más importante para realizar antes de un partido, por otro lado, el corte por succión/rotativo es utilizado en operaciones de limpieza luego de los partidos o entrenamientos y, en algunos casos, para que los cortes iniciales dejen el césped en pie. Finalmente, el corte vertical que es un manejo imprescindible, principalmente en las canchas de césped bermuda híbrida, que tendrán mayor tendencia a la formación de colchón de césped (thatch). El thatch es la capa orgánica que se forma en los suelos con césped, la misma está compuesta por material vegetal vivo y en descomposición cuando este es excesivo. Este colchón dificulta el rodamiento de la pelota, dejando el ritmo de juego más lento, además de perjudicar mucho el aspecto fitosanitario del césped, volviéndolo un ambiente ideal para el desarrollo de enfermedades fúngicas y ataque de insectos (Conmebol, 2019).

2.3.2 Riego

El riego es una práctica fundamental para la sobrevivencia de cualquier vegetal. Se debe tener en cuenta en primer lugar la calidad del agua, donde Conmebol (2019) define los parámetros más importantes como la concentración total de sales solubles, contenido de sodio (Na), proporción relativa de sodio a calcio (Ca) y magnesio (Mg),

contenido de cloruro (Cl), boro (B), bicarbonato (HCO_3) y carbonato (CO_3), y pH. Otros parámetros que generalmente se encuentran en un informe de prueba de agua y que deben revisarse son el contenido de nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio, entre otros) y el contenido de cloro (Conmebol, 2019). Por otro lado frecuencia y cantidad de riego está determinada por la especie de césped (debido a su ETC), el clima, y el tipo de suelo (Merino & Ansorena, 1998).

2.3.3 Fertilización

Como primer punto, Merino y Ansorena (1998) indican que las principales variables a tener en cuenta para realizar una fertilización se ajustan a las especies vegetales y el tipo de suelo sobre el cual están creciendo las mismas. A su vez, autores e instituciones como Conmebol (2019), Thomas (1976), Álvarez (2006) y Monje Jiménez (2006) mencionan que las dosis y tipo de nutrientes a aplicar varían según tipo de suelo, especie y clima. Por lo tanto, fijan criterios a seguir para cumplir con una fertilización adecuada. Todos los autores mencionan la importancia de utilizar fertilizantes completos, priorizando los nutrientes NPK, realizando las fertilizaciones en la época de mayor demanda de nutrientes por el césped y ajustándose a partir de aquel o aquellos primariamente faltantes.

2.3.4 Control de plagas, malezas y enfermedades.

Conmebol (2019) menciona que, la realización de malas prácticas como cortes bajos y espaciados en el tiempo con cuchillas desafiladas o sin ajustar, riegos muy continuos y abundantes, así como una incorrecta formulación de fertilización, son las principales razones para la aparición de enfermedades, especialmente hongos y aparición de malezas.

Las malezas son aquellas hierbas o plantas que crecen fuera del espacio de implantación, de manera que una misma especie puede ser o no maleza según donde esté ubicada (Parracia, 2012). Las malezas no sólo proporcionan una estética indeseada, sino que también compiten con el césped cultivado por agua, nutrientes, radiación solar y espacio, siendo las especies más comunes *Taraxacum officinale*, *Trifolium sp*, *Poa annua* (Álvarez, 2006; Parracia, 2012; Thomas, 1976).

2.3.5 Manejo del suelo

Otra práctica importante para realizar en los suelos sobre los cuales hay césped, principalmente en aquellos que poseen mucho tráfico (como los campos deportivos), es la aireación. Conmebol (2019) define la aireación como la creación de perforaciones en la superficie de la cancha para mejorar la infiltración del agua y el intercambio gaseoso. El objetivo de esta práctica es disminuir la compactación del suelo, favoreciendo así un mejor desarrollo de las raíces, así como también modificar el perfil del suelo en canchas antiguas, construidas con arcilla, a través de aireaciones sucesivas y en caso de formarse controlar la formación de exceso de colchón de césped.

2.3.6 Topdressing y materiales a utilizar

Para Conmebol (2019) el topdressing o aplicación de arena en cobertura, tiene como finalidad la nivelación de la superficie, reducir la capa de colchón de césped (thatch) que se forma sobre el campo deportivo. A su vez, provee una superficie de juego más firme. Por otro parte, para Tencza (2014) el topdressing es el proceso de aplicación de un material a la superficie del césped establecido, que se realiza más comúnmente con arena para promover superficies de juego suaves y controlar la acumulación de materia orgánica.

Si bien el topdressing se realiza comúnmente con arenas, el compost debido a sus propiedades y gracias a que puede ser aplicado al igual que la arena, puede ser utilizado para esta práctica. Compost significa abono compuesto de una gran variedad de materiales orgánicos, que sufriendo un proceso de fermentación se obtuvo como producto final humus (Ferré, 2015). Haug (1993), define el compost como la materia orgánica que se ha estabilizado hasta transformarse en un producto parecido a las sustancias húmicas del suelo, que está libre de patógenos y de semillas de malas hierbas, que no atrae insectos o vectores, que puede ser manejada y almacenada sin ocasionar molestias y que es beneficioso para el suelo y el crecimiento de las plantas.

Distintos autores como Bero y Soldat (2022) y Orrico Junior et al. (2018) obtuvieron resultados que concluyen que la utilización de compost en topdressing es beneficiosa para el césped obteniendo una mejor calidad visual del mismo acompañado de mejoras de las propiedades físicas y químicas del suelo. Para Ferré (2015) el compost genera una mejora en las propiedades del suelo, principalmente en suelos arenosos, donde se mejora tanto su estructura como su retención de agua. Por otra parte, en suelos arcillosos, presenta una mejora en términos de drenaje y retención de humedad, así como disminuir la erosión del suelo. Además, el compost alimenta microorganismos, libera nutrientes, neutraliza toxinas, es inductor de microfauna y pequeños animales del suelo y nivelador de pH. El compost se añade a las capas de enraizamiento de arena en los céspedes deportivos con el fin de aumentar la retención de agua y nutrientes, reducir la dureza e incrementar la firmeza del suelo (Merino & Ansorena, 1998).

Merino y Ansorena (1998) mencionan que la mayoría de los campos deportivos contienen un valor menor al 10% de materia orgánica, lo que influye sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. Generalmente el efecto del agregado de cantidades moderadas de materia orgánica en las propiedades físicas es positivo, ya que se reduce la dureza del suelo y mejora la estructura y la retención de agua. Por último, la materia orgánica descompuesta ejerce un papel esencial en la nutrición de las plantas. En relación con esto sabemos que la materia orgánica aporta a elevar la porosidad, lo que le permite retener una considerable cantidad de agua e incrementar el intercambio gaseoso (Monje Jiménez, 2006).

Tencza (2014) concluyó y discutió que las aplicaciones de topdressing de compost de hojas redujo significativamente la dureza de la superficie, aumentó la humedad volumétrica del suelo, y modificó considerablemente las propiedades físicas y químicas del suelo. En este sentido, este mismo trabajo menciona que las aplicaciones en cobertura de compost redujeron la densidad aparente, aumentó la humedad del suelo y redujo la dureza superficial. Además, se obtuvo que la porosidad total y el contenido de materia orgánica aumentó significativamente a medida que aumentaron las aplicaciones de compost, esto se contrasta con lo obtenido por otros autores como Bondí et al. (2024) y Evanylo et al. (2016).

2.4 COMPACTACIÓN

Álvarez (2006), menciona que la compactación del suelo en un campo de juego está determinada por la composición del suelo, intensidad de uso de este y la maquinaria utilizada sobre ellos para realizar los trabajos (Johnson & Sallberg, 1960).

Según Baker (1991, como se cita en Merino & Ansorena, 1998) sostiene que el suelo deportivo se encuentra sometido a un intenso efecto de compactación y destrucción de su estructura, destruyendo los agregados y en consecuencia disminuyendo la porosidad total, generando un aumento de la densidad aparente y

aireación. Por su parte, el agua es retenida con más fuerza en los poros más pequeños, disminuyendo así la disponibilidad para la planta y reduciendo el drenaje (Merino & Ansorena, 1998).

Rucks et al. (2004) explica que la medida de la resistencia a la penetración se realiza con un instrumento denominado penetrómetro. Este instrumento posee un elemento semejante a una aguja, que se introduce en el suelo por impactos de una determinada magnitud, o por medio de una presión constante. Luego de aplicados cierto número de impactos, o un tiempo determinado de presión constante, según el tipo de aparato, se determina la profundidad de suelo penetrada por la aguja. También se puede medir la presión en KPa o Mpa así como la profundidad que penetra el sensor al tomar las medidas (Rucks et al., 2004). Las medidas obtenidas con este aparato se toman como índice de la resistencia mecánica que ofrece el suelo al crecimiento radicular, lo cual depende de la magnitud del espacio poroso grueso, y su rigidez, la que es afectada por el contenido de humedad del suelo, sin embargo, la resistencia del penetrómetro es mayor que la resistencia de las raíces, algunas de las razones que explican esto es que el penetrómetro no puede variar de la línea de avance cuando hay un agregado resistente en el camino (Tencza, 2014). Diferentes autores como Mosaddeghi et al. (2004) y Giuliani et al. (2024), determinan el valor de 2000 kPa como un punto de compactación del suelo muy elevado en el cual el desarrollo radicular es limitado afectando la salud y calidad de las especies vegetales.

Por otro lado, Hillel (1998) define que la resistencia a la penetración del suelo se puede representar al menos de dos formas, en primer lugar, como la fuerza requerida para causar la penetración, por unidad de área de la punta de la sonda, o como la energía requerida para introducir la sonda en el suelo, por unidad de profundidad de suelo. Hillel (1998) define la compactación en términos agronómicos cuando la porosidad total (en particular, la porosidad llena de aire) es tan baja que restringe la aireación; así como cuando el suelo es tan apretado, y sus poros tan pequeños como para impedir penetración de raíces, infiltración y drenaje. Por su parte Al-Gaadi (2012) definió a la compactación como el aumento de la densidad del suelo y resistencia y la reducción de los macroporos del suelo.

García Préchac et al. (s.f) sostienen que la compactación se mide a través de la resistencia a la penetración y la densidad aparente. Aunque estas están relacionadas entre sí, y a su vez con otras propiedades del suelo (textura, contenido de materia orgánica, etc.), sus efectos pueden diferenciarse desde el punto de vista práctico. El endurecimiento suele ser un efecto pasajero vinculado a las condiciones de humedad, en cambio la densificación es de carácter más estable. A su vez, Tencza (2014) relaciona la resistencia a la penetración con penetrómetro de cono con muchos parámetros físicos, mecánicos e hidráulicos. En relación con esto Hillel (1998) afirma que el efecto de compactación reduce la porosidad, y especialmente el volumen de los grandes poros entre agregados, también afirma que otro factor natural que puede contribuir a la compactación del suelo es la tendencia del suelo arcilloso a contraerse al secarse.

Según Rucks et al. (2004) la resistencia de un suelo a la penetración es un índice integrado que combina varios factores como la compactación del suelo, contenido de humedad, textura y tipo de arcilla entre otros. Para corregir los efectos del contenido de humedad en términos porcentuales sobre los resultados obtenidos de RP, se utiliza un método de corrección. Duarte et al. (2022) proponen un comportamiento no lineal entre estas dos variables, basado en cuatro etapas de monitoreo secuenciales del estado físico del suelo. Según De la Cruz (2008) un modelo multinivel pertenece a una

población con estructura jerárquica. Una muestra de tal población puede ser descrita como una muestra multicéntrica: primero tomamos una muestra de unidades del más alto nivel (por ejemplo, hospitales), y luego muestreamos las subunidades de las unidades disponibles (pacientes dentro de los hospitales). En tales muestras, las observaciones individuales no son completamente independientes. Para De la Cruz (2008) es claro que decidir si un efecto de una variable será considerado fijo o aleatorio dependerá en gran parte del contexto o de los objetivos del estudio. En los modelos multinivel como unidades (agrupamientos) que definen los niveles, son vistos como efectos aleatorios, de esta forma, como muestras aleatorias de una población de estas unidades. Estos efectos aleatorios se traducen en un modelo de coeficientes aleatorios que van a tomar en cuenta la variabilidad entre agrupamientos, desde formas simples, a través de variabilidad a nivel del intercepto, o de formas más complejas, a través de variabilidades a niveles de inclinaciones de dos rectas.

2.5 UTILIZACION DE UAV, SENSORAMIENTO REMOTO, IMÁGENES MULTIESPECTRALES, ÍNDICES ESPECTRALES

La detección a partir de sensores remotos ofrece una alternativa rápida y no destructiva para evaluar parámetros fisiológicos de la planta, como por ejemplo tolerancia al estrés. Galieni et al. (2021) consideran que la detección de estrés en las plantas a través de la teledetección es uno de los aspectos más importantes para la mejora del crecimiento de los cultivos. Las cámaras multiespectrales cumplen un rol fundamental en la agricultura de precisión, al captar anchos de banda superiores al espectro visible.

Un ejemplo de esto es el infrarrojo cercano (NIR), el cual puede ser utilizado para realizar el cálculo de índices de vegetación como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), permitiendo evaluar el vigor de las plantas mediante el cálculo de este (El-Hendawy et al., 2019). Burbrink y Straw (2023), determinaron la calidad del césped mediante el índice de diferencia de vegetación normalizado (NDVI), el mismo lo calcularon a partir de la utilización de longitudes de onda reflejadas del rojo y del NIR. Bero y Soldat (2022) obtuvieron resultados con diferencias significativas representadas por un aumento en el NDVI a partir de la utilización de compost sobre los mismo comparado con los controles, siendo el valor del mejor compost de 0,742 y el del control 0,661.

Las utilidades de UAV y el uso de imágenes multiespectrales está teniendo un uso extendido en el último tiempo en la agricultura. Peña-Barragán et al. (2013) presenta una innovación tecnológica que consiste en la adquisición de imágenes multiespectrales de muy alta resolución espacial con un vehículo aéreo no tripulado (UAV) y el análisis automático de dichas imágenes con el objetivo de detectar malas hierbas. Por otro lado, distintos autores como Galieni et al. (2021), Burbrink y Straw (2023), Bero y Soldat (2022) usan este mismo sistema para detectar el estado de desarrollo y sanitario del césped.

Díaz et al. (2022) explica la metodología de trabajo con estas herramientas, las cuales se basan en la utilización de una cámara multiespectral para la obtención de las imágenes, las cuales pasan a una etapa de procesamiento conformada por la alineación y reconstrucción de un ortomosaico RGB. Posteriormente, se utilizan dos o más bandas para los cálculos a realizar, comparación y análisis de diferentes índices de vegetación. Es importante además definir las resoluciones trabajadas a la hora de tomar imágenes, Kimura Hayama et al. (2007) y Théau (2008) definen la resolución espacial como la distancia mínima necesaria (en mm) entre dos objetos para poderlos distinguir como

separados. Entre menor sea esta distancia, mayor es la resolución espacial siendo un aspecto fundamental de la teledetección. Por otro lado, la resolución temporal se define como la cantidad de tiempo necesaria para volver a visitar y adquirir datos para la misma ubicación. Cuando se aplica a la teledetección, esta cantidad de tiempo depende de las características orbitales de la plataforma del sensor, así como de las características del sensor en caso de estar sobre un UAV. La resolución temporal es alta cuando el retraso de la revisión es bajo y viceversa, la misma suele expresarse en días.

Galieni et al. (2021), a su vez define el sensoriamiento remoto como un conjunto de técnicas que permiten asociar las propiedades químicas o físicas de los objetos, desde cualquier distancia, a través del registro, medida e interpretación de imágenes espectrales. Con las imágenes multiespectrales los procesos involucrados se basan principalmente en la interacción entre la radiación electromagnética y las plantas. Dado que cualquier condición estresante puede inducir numerosas y complejas alteraciones fisiológicas y respuestas bioquímicas en las plantas, el estado saludable de un cultivo podría detectarse a través de la técnica de teledetección.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

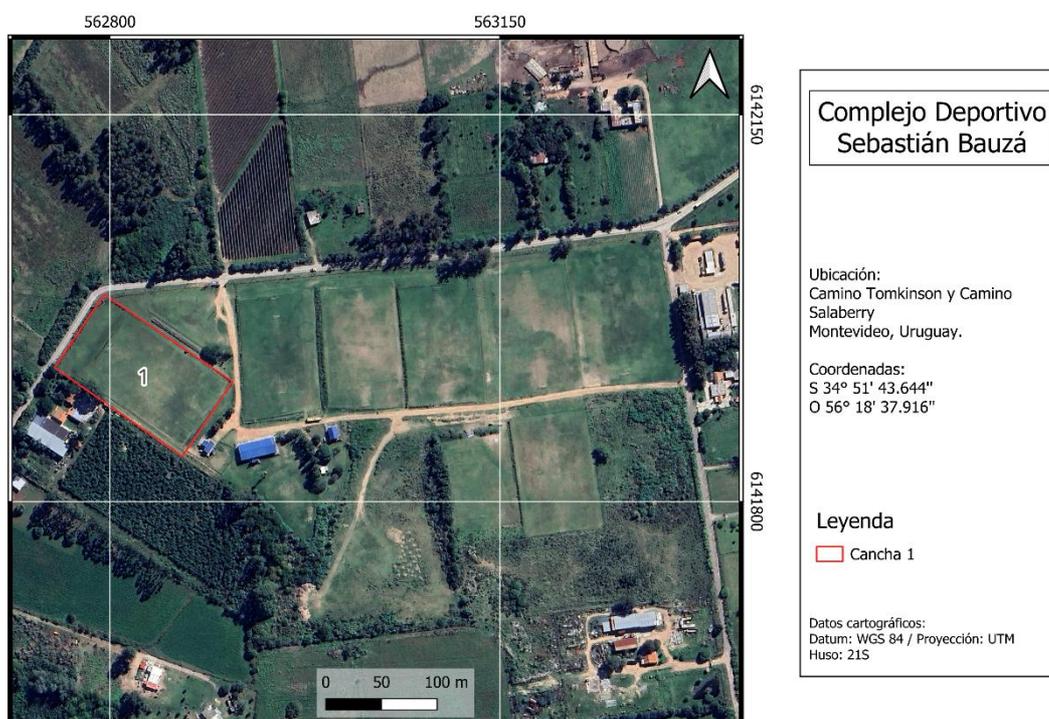
3.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO

El sitio donde se desarrolló el trabajo de campo fue el Complejo Deportivo Sebastián Bauzá perteneciente al Club Atlético Bella Vista, ubicado en Camino Tomkinson esquina Camino Salaberry, Montevideo, Uruguay (S 34° 51' 43.644", O 56° 18' 37.916").

El complejo consta de 8 canchas, siete con dimensiones 105x68 m y una con medidas de fútbol 7 (60 x 45 m), siendo a cancha número uno, la principal en la cual se disputan los partidos oficiales de formativas del club. El uso de estas canchas es principalmente de las categorías juveniles del club, además de clubes que alquilen las canchas. Como se observa en la figura 1, la cancha número 1 está delimitada dentro del complejo.

Figura 1

Ubicación geográfica del Complejo Deportivo Sebastián Bauzá



Nota. Elaborado a partir de Google (2023).

Las canchas fueron construidas a partir de movimiento y nivelaciones de tierra del mismo lugar o adyacentes, por lo tanto, no tienen un perfil de suelo propio si no un perfil totalmente modificado. Los suelos presentes pertenecen a la formación Toledo y sus características se describen en la (Tabla 1). De las 8 canchas solamente 2 cuentan con riego, una de ellas, la cancha 1, cuenta con un sistema de riego por aspersión en 5 líneas constituidas con un total de 27 aspersores. El agua utilizada es extraída a partir de un pozo subterráneo.

Tabla 1
Descripción de suelo Formación Toledo

Horizonte	Profundidad (cm)	Características
Ap	0-20	Pardo muy oscuro a pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 2.5/2); franco limoso a franco arcillo limoso; bloques subangulares pequeños, moderados a débiles: transición clara.
B ₁	20-43	Pardo muy oscuro a pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 2.5/2); franco arcillo limoso; bloques angulares grandes moderados; películas de arcilla delgadas y discontinuas: transición clara.
B ₂₁	43-55	Pardo muy oscuro (10 YR 2/2): arcilloso a arcillo limoso; bloques angulares grandes, fuertes; películas de arcilla gruesas y continuas raíces comunes; transición gradual.
B ₂₂	55-75	Pardo oscuro (10 Y 3/3); arcillo limoso; bloques angulares grandes; fuertes; películas de arcilla gruesas y continuas; raíces comunes; transición gradual.
Cca	75+	Pardo (7.5 YR S/4); franco arcillo limoso; películas de arcilla delgadas en manchas: pocas raíces.

Nota. Tomado de Dirección de Suelos y Fertilizantes (1976).

Tabla 2
Análisis químico de Formación Toledo

Horizonte	Profundidad (cm)	Análisis granulométrico			pH		Materia orgánica	N total	CaCO ₃	Fe ₂ O ₃
		Arena	Limo	Arcilla	H ₂ O	KCL N	%	%	%	%
Ap	0-20	11.9	61.4	26.7	6.30	5.30	3.90	0.19		
B ₁	20-43	14.5	48.1	37.4	6.60	5.70	2.55	0.16		
B ₂₁	43-55	10.3	39.3	50.4	7.00	5.70	2.07	0.14	0.26	
B ₂₂	55-75	7.6	46.2	46.2	7.80	6.40	1.09	0.08	0.15	
Cca	75+	11.2	56.4	32.4	8.10	6.40	0.36	0.05	0.24	

Nota. Tomado de Dirección de Suelos y Fertilizantes (1976).

Tabla 3
Complejo de intercambio

Horizonte	Prof (cm)	Complejo intercambio meq/100g							% Saturación		
		Ca	Mg	K	Na	BASES	AL	CIC pH7	CIC pH5	pH7	pH8.2
Ap	0-20	13.7	3.8	0.8	0.4	18.7		21.6	25.8	86.6	72.5
B1	20-43	15.0	5.3	0.7	0.5	21.5		22.3	27.4	96.4	78.5
B21	43-55	19.5	9.4	0.7	0.9	30.5		30.5	37.2	100	82.0
B22	55-75	19	11.9	0.9	1.4	33.2		33.2	37.4	100	88.8
Cca	75+	15.7	13.8	1.0	1.8	32.3		32.3	36.3	100	89.0

Nota. Tomado de Dirección de Suelos y Fertilizantes (1976).

3.2 ENSAYOS

3.2.1 Ensayo a campo

A lo largo de este trabajo de investigación se aplicaron 3 tratamientos, diferenciándose entre sí por material utilizado, los cuales se componen de arena, compost y una combinación de ambos en partes iguales. Los tratamientos fueron aplicados el día 26 de octubre del 2022 en la cancha número 1, donde se realizó un total de tres parcelas por tratamientos, más tres parcelas correspondientes al testigo, dando un total de 12. La aplicación de los tratamientos fue realizada con una arenadora producida en la ciudad de Blaine en Estados Unidos, él es Meter-R-Matic III top dresser que fue transportada mediante un tractor italiano marca Landini modelo Mistral 45.

Figura 2
Maquinaria y aplicación de materiales



3.2.2 Bioensayo

Fueron utilizadas tres macetas por tratamiento (testigo, arena, arena y compost, compost), todas contenían suelo del lugar donde se realizó el análisis de penetración, completando la capacidad de la maceta según corresponda con el tratamiento, con el fin de simular el ensayo de campo. El ensayo se instaló el 15 de agosto del 2023 siendo la germinación el día 23 del mismo mes.

Figura 3
Bioensayo



El bioensayo se realizó en condiciones controladas en invernáculo, sembrando semilla viable de *Ryegrass* anual LE 284 en macetas de 12 centímetros de circunferencia. Las condiciones de riego fueron homogéneas durante la realización del ensayo, aplicando 0,25 litros de agua por maceta con una frecuencia de riego de 3 a 4 veces por semana. La temperatura estuvo controlada durante todo momento, alcanzando un valor promedio de mínima de 13,7°C y el promedio de máxima

temperatura de 31,5°C. Todas las macetas contenían suelo extraído de donde se realizó el ensayo a campo, de forma de visualizar el efecto del topdressing.

A partir del 2 de octubre se realizaron mediciones semanales de altura del césped. En esta instancia se realizó un corte y las posteriores mediciones se realizaron cada una semana, correspondiéndose a los días nueve, dieciséis y veintitrés del mencionado mes.

3.3 OBTENCIÓN DE IMÁGENES

Además de las mediciones en altura, se tomaron imágenes a partir de un dron DJI modelo Inspire 1 (DJI, Shenzhen, China) equipado con una cámara multispectral, modelo Sentera Multispectral 6x Thermal (MN, USA). Las imágenes fueron tomadas al aire libre, en condiciones de pleno sol.

Una vez tomadas las imágenes, el posterior procesamiento consto de alinear las mismas y generar un ráster a partir de una nube de puntos tridimensional, con las bandas disponibles: Red (670 nm), Green (550nm), Red Edge (715 nm), NIR (840 nm) y un canal adicional RGB.

A partir de la obtención de los ráster fue realizado el cálculo de distintos índices de vegetación, los cuales utilizan en su expresión matemática las bandas del espectro visible. Las fórmulas correspondientes a cada índice utilizado fueron las siguientes (Heidarian et al., 2020):

$$NDVI = \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \quad \text{Ec.1}$$

$$SAVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED+L) \times (1+L)} \quad \text{Ec.2}$$

$$GNDVI = \frac{(NIR-GREEN)}{(NIR+GREEN)} \quad \text{Ec.3}$$

$$OSAVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED \times 0,16)} \quad \text{Ec.4}$$

$$NDRE = \frac{(NIR-REEDGE)}{(NIR+REEDGE)} \quad \text{Ec.5}$$

3.4 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

En cada parcela del ensayo se extrajeron tres muestras de suelo a partir de un muestreador de densidad aparente para las profundidades de 0 a 5 cm y de 5 a 10 cm. A cada muestra de suelo obtenida se le registró su peso a campo con una balanza de precisión. Una vez finalizado el trabajo a campo, las muestras fueron debidamente almacenadas y trasladadas al laboratorio. Una vez en laboratorio se procedió al secado de estas en estufa de circulación forzada modelo Nova Ética 400/7D-300 (Nova Ética, SP, Brazil) a 105°C hasta peso constante. Con el registro inicial del peso de cada muestra y su peso seco se obtuvo el contenido de humedad gravimétrica en %. Seguidamente, en el área circundante a la zona de toma de cada muestra de suelo, se registró la resistencia a la penetración a las mismas profundidades con un penetrómetro marca Falker, modelo penetroLOG PLG2040 (Falker, RS, Brasil). Se obtuvieron tres medidas por punto de muestreo y profundidad, las cuales fueron posteriormente promediadas.

Una vez obtenido los datos se realizó un ANOVA, comparando los distintos resultados de resistencia a la penetración según tratamientos (arena, arena y compost, compost, y el testigo) tanto como para la profundidad 0 a 5 cm y 5 a 10 cm, y a su vez

corregidos y sin corregir por la humedad del suelo. Además, se procedió a estudiar los resultados a partir de una prueba *t* a una cola.

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

3.5.1 Corrección por humedad

En primera instancia se debe ajustar una función de regresión, encontrando una relación entre la humedad y la resistencia a la penetración. El modelo probado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 \times \log(H_{ij}) + u_i + \varepsilon_{ij} \quad \text{Ec.6}$$

Donde:

- Y_{ij} : Valor observado de la respuesta para la observación *j* en el grupo *i*.
- β_0 : Intercepto fijo (común para todos los grupos).
- β_1 : Coeficiente fijo asociado a $\log(H)$.
- H : Contenido de humedad (%).
- u_i : Efecto aleatorio específico del grupo *i* ($u_i \sim N(0, \sigma_u^2)$).
- ε_{ij} : Término de error residual ($\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$).

A continuación, debe establecerse un valor de humedad de referencia, para este trabajo en cuestión fue de 14%, obtenida a partir del promedio de todas las medidas de humedad y cuantificadas a campo. Con este valor se calcula diferencia de resistencia a la penetración. Las diferencias obtenidas se relacionan con la humedad del suelo, obteniéndose así una función matemática ajustada llamada ecuación de corrección. Como última etapa, se aplica una corrección basada en la relación entre RP y la humedad del suelo. Esta corrección consiste en restar el exceso cuando la RP a cualquier nivel de humedad del suelo supera la RP correspondiente a la humedad de referencia, o en sumar la diferencia cuando ocurre lo contrario.

3.5.2 Análisis de RP

Para el análisis de las variables RP y DRP se utilizó un modelo lineal multinivel mixto (LMM). Los modelos LMM permiten agrupar los valores de RP y DRP según los tratamientos realizados, de forma de poder realizar un correcto análisis de las variables. Se realiza las pruebas formales de Shapiro-Wilks y Levene test con el fin de comprobar la distribución normal de los residuales y homogeneidad de varianza respectivamente.

En primera instancia fue realizado un ANAVA para poder evidenciar si existen diferencias entre los distintos niveles de los tratamientos que fueron aplicados. Los ANAVA fueron realizados entre el contenido de humedad y la resistencia a la penetración, a ambas profundidades. Seguidamente al ANAVA se realizó una comparación de medias aplicando el método Bonferroni, el cual permite ajustar el nivel de error en función del número de comparaciones que exista (Dagnino, 2014).

Por último, la prueba que se realizó para comparar los valores de RP fue la prueba *t* a una cola. Esta permite determinar entre dos medias cual es superior o inferior a la que se esté comparando (García-García et al., 2013). Los valores que se comparan son el valor promedio RP por tratamiento sin corregir y corregido con un valor estándar, que es 2000 kPa (Van Zyl & Hoffman, 2019)

3.5.3 Análisis estadístico bioensayo

En principio se procedió con el ajuste de un modelo matemático donde incluye como variable a los distintos índices de vegetación presentados en la sección 3.3. Para la selección del índice de vegetación se realizó un análisis de correlación entre los distintos índices. Este paso permite ver la relación existente entre las variables. Se analizó la relación entre los índices y la variable altura, además de la relación de los índices entre sí. Un valor de correlación alto es aquel que está más cercano a 1, cuando el coeficiente de correlación se acerca a 0 quiere decir que no existe correlación entre las variables (Roy-García et al., 2019).

Una vez seleccionado el índice con mayor correlación con la altura, se procede a realizar el ajuste del modelo lineal entre ambas variables. El modelo aplicado fue el siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \times \alpha + \varepsilon_i \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

- Y: Valor de altura, es la variable de respuesta.
- β_0 : Intercepto del modelo, el valor de Y cuando $\alpha = 0$.
- β_1 : Pendiente, mide el cambio de Y por cada unidad de variación de α .
- α : Valor de la variable independiente, índice espectral.
- ε_i : Término de error, variabilidad no explicada por el modelo ($\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$).

Posteriormente se realizan las pruebas formales de Shapiro-Wilk, Breusch-Pagan y Durbin-Watson, los mismos permiten evaluar la distribución normal de los residuos, evaluar la homogeneidad de varianzas e independencia de los residuos respectivamente. Para esas pruebas, el nivel de significancia que fue evaluado fue un p-valor $> 0,05$, y así poder decidir sobre los siguientes juegos de hipótesis:

- Distribución normal de los residuales:
 - H_0 : Los residuos siguen una distribución normal.
 - H_a : Los residuos siguen una distribución distinta a la normal.
- Homogeneidad de varianzas:
 - H_0 : las varianzas son homogéneas.
 - H_a : las varianzas no son homogéneas.
- Independencia de los residuales:
 - H_0 : Los residuales son independientes entre sí
 - H_a : los residuales no son independientes.

Una vez obtenido el modelo correcto, se realizó el análisis de varianza de modo de poder comparar el efecto de los tratamientos sobre la variable de respuesta (altura). Finalizando este análisis se hizo una comparación de medias a partir de la prueba de Tukey, con el fin de poder evidenciar diferencias significativas entre los tratamientos sobre la altura.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN Y CORRECCION DE RP POR CH.

4.1.1 Modelos de corrección:

A partir del modelo presentado en la ecuación número 6, el cual explica la relación entre la RP y el CH, se obtuvieron los siguientes parámetros para los modelos:

$$RP = -1463,33 - 1394,02 \times \log (H) \quad \text{Ec.8}$$

$$DRP = -2740,80 - 1394,02 \times \log (H) \quad \text{Ec.9}$$

A continuación, se muestran los valores de R^2_{PM} y R^2_{PC} , donde el primero representa el valor promedio de R^2 para varios niveles de tratamiento y el segundo realiza el cálculo de R^2 considerando predictores centrados en su media. Los resultados para ambos modelos fueron los siguientes:

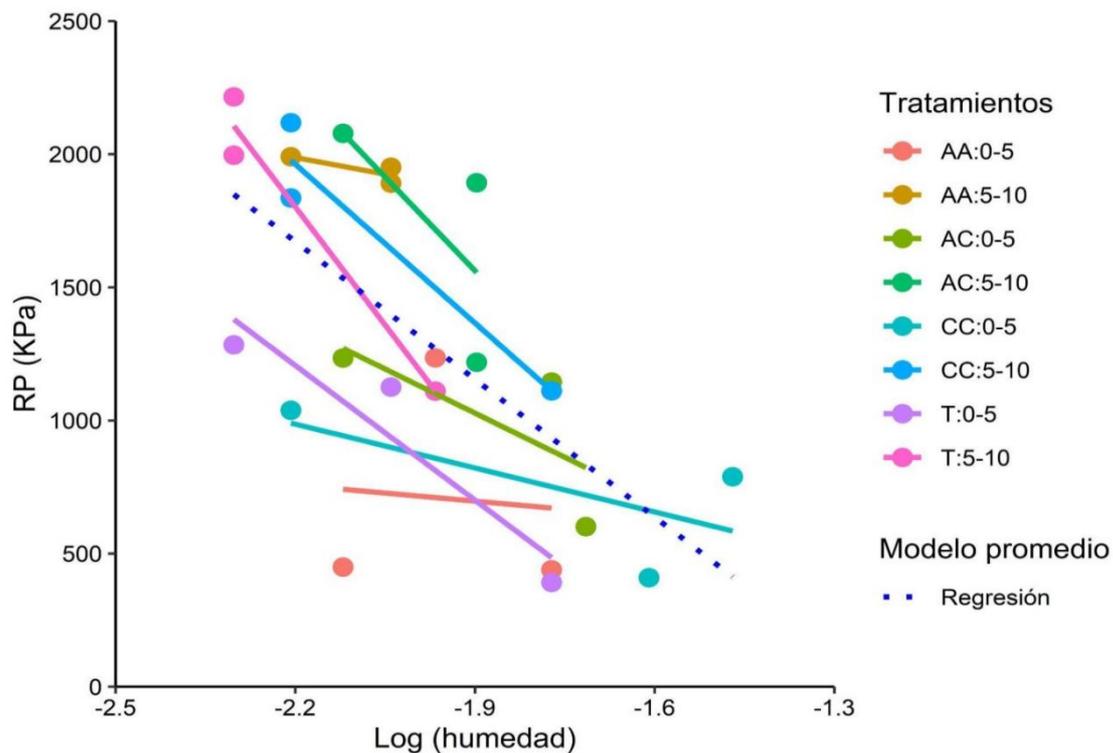
Tabla 4

Coefficientes de determinación para los modelos de RP y DRP

Modelo	R^2_{PM}	R^2_{PC}
RP	0,31	0,69
DRP	0,57	0,57

Como se muestra en las siguientes figuras se puede observar para los modelos las variaciones de RP y DRP en función del CH, a su vez, se presenta el comportamiento de las variables para cada grupo de los tratamientos. Como se puede observar el comportamiento de las rectas es similar, donde en su mayoría tiende a disminuir la RP a medida que aumenta la humedad del suelo.

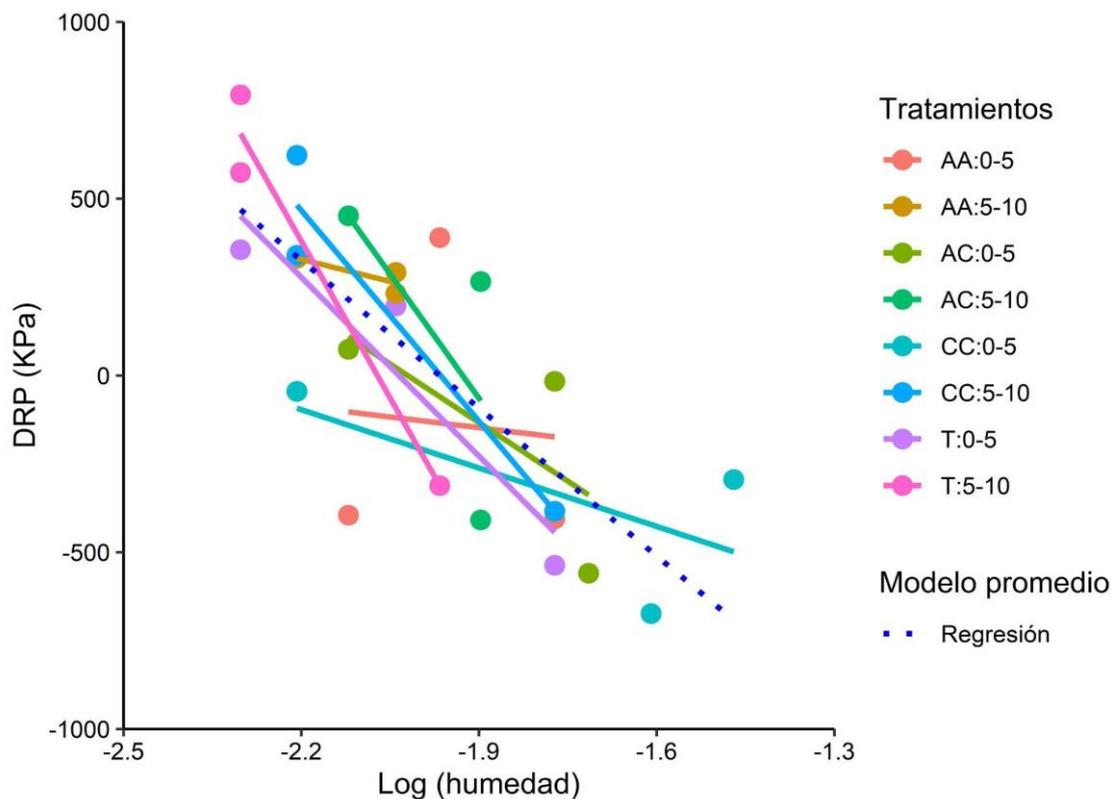
Figura 4
Modelo gráfico de RP y contenido de humedad



Nota. La línea punteada azul indica el modelo para todos los datos y las líneas continuas de colores indican la respuesta del modelo cada tratamiento.

En cuanto al modelo obtenido para la estimación de la DRP en función del contenido de humedad del suelo, podemos ver un comportamiento muy similar al modelo para la RP mostrado previamente.

Figura 5
Modelo gráfico de DRP y contenido de humedad



Nota. La línea punteada azul indica el modelo para todos los datos y las líneas continuas de colores indican la respuesta del modelo cada tratamiento.

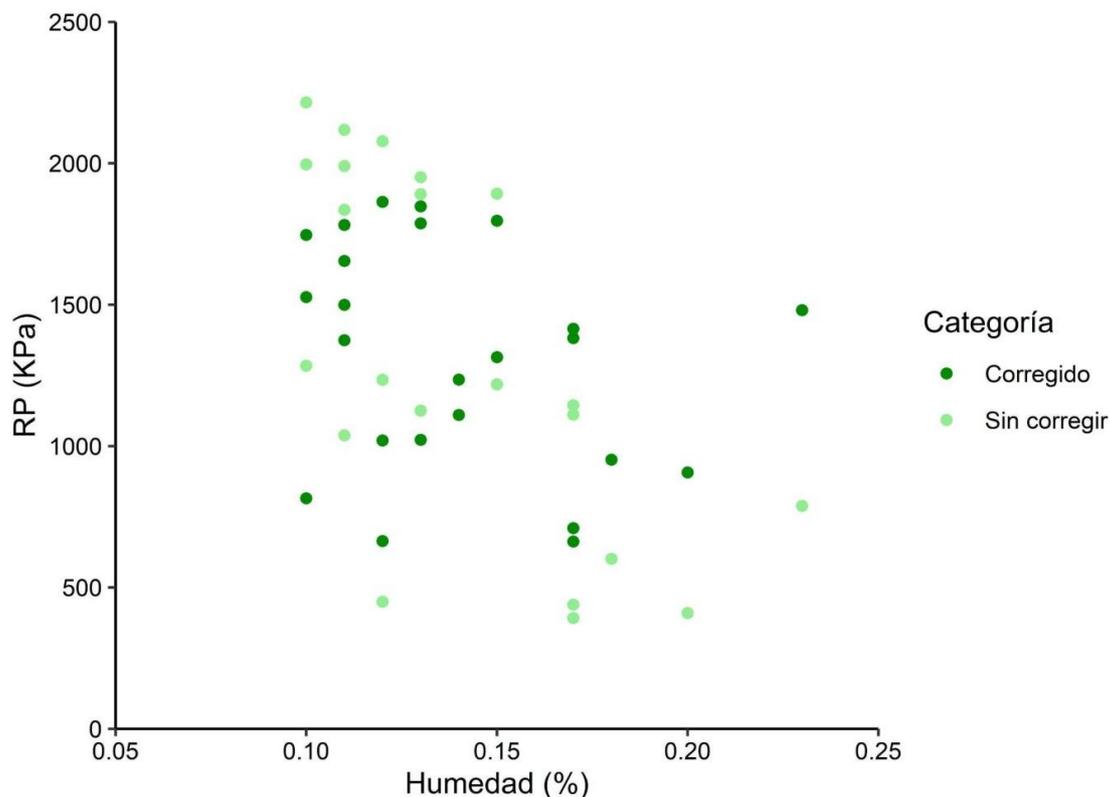
Como se observa en las gráficas presentadas (figura 4 y 5) la relación existente entre la RP y el logaritmo de la humedad es negativa, por lo tanto, al aumentar la humedad, la RP tenderá a disminuir. A su vez, dado los valores de R^2_{PM} y R^2_{PC} , evidencian que los modelos son capaces de explicar una importante porción de la variabilidad de la RP y DRP incluyendo el contenido de humedad del suelo como explicación de dicha variación.

4.1.2 Dispersión de datos con y sin corrección:

Como podemos observar a continuación en la figura 4, los datos de resistencia a la penetración sin corregir muestran una disminución de su valor al aumentar el CH. Por otro lado, los datos corregidos de RP no visualizan ninguna tendencia, distribuyéndose aleatoriamente por todo el diagrama. En este sentido, podemos ver la importancia y efectividad de la corrección de los datos de RP (Duarte et al., 2020).

Figura 6

Diagrama de dispersión comparativa de los registros de RP y RPC

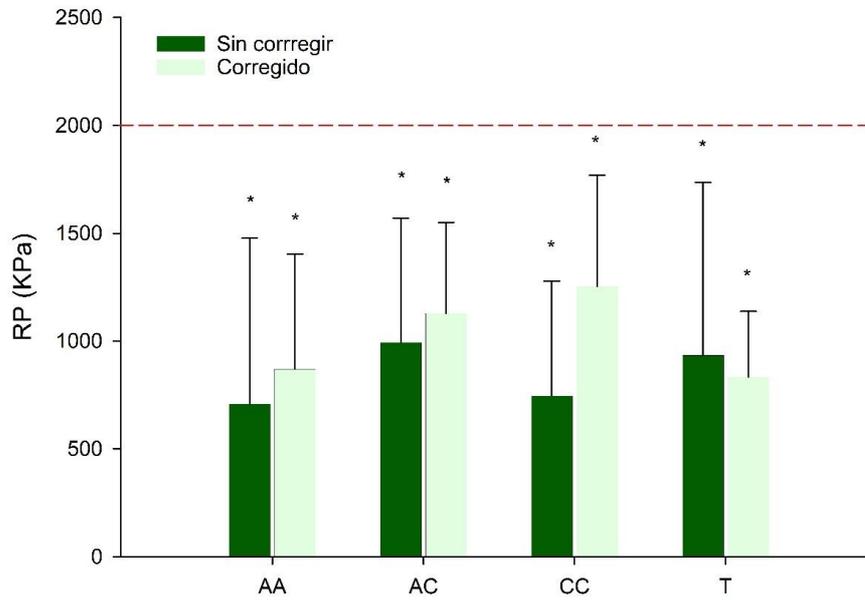


4.2 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

La humedad es un factor sumamente relevante y variable en el suelo, autores como García Préchac et al. (s.f.), Pinzón-Gómez et al. (2016) y Rucks et al. (2004) mencionan que posee gran variabilidad espacial y temporal, dentro de un mismo perfil de suelo donde puede variar ampliamente con centímetros de diferencia. Distintos factores afectan el contenido de humedad del suelo, dicha variable está influenciada directamente por las propiedades físicas, químicas y biológicas de cada suelo, así como también la topografía, material parental, cobertura vegetal y el uso del suelo. Estos a su vez afectan los procesos que ocurren dentro del perfil como el intercambio gaseoso, variación de temperatura y la resistencia mecánica y propiedades muy importantes como estructura del suelo, conductividad hidráulica y la erosión entre otros (Pinzón-Gómez et al., 2016). Asimismo, existen numerosos factores que influyen en la dinámica del agua en el suelo y por lo tanto su capacidad de retener agua, lo cual está principalmente determinado por la textura y estructura del suelo (Straw et al., 2020).

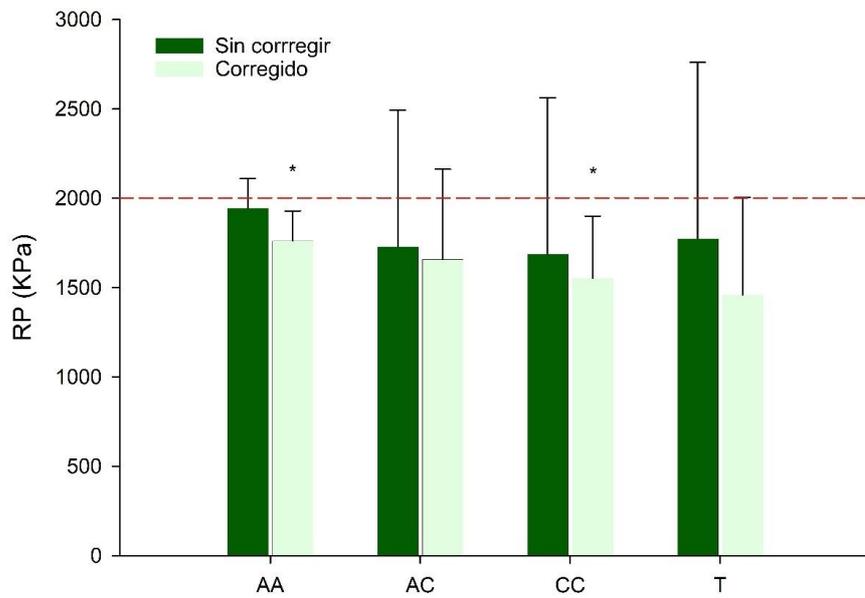
Por lo expuesto anteriormente y observando las figuras obtenidas (figura 5 y 6) se evidencia la importancia de realizar esta corrección por humedad.

Figura 7
RP de 0-5 cm



Nota. La presencia de asteriscos indica valores de RP significativamente menores al umbral.

Figura 8
RP de 5-10



Nota. La presencia de asteriscos indica valores de RP significativamente menores al umbral.

Para los primeros 5 cm de suelo no se registran valores de RP que estén reflejando problemas de compactación para cada uno de los tratamientos. Sin embargo, de 5 a 10 cm, con los datos corregidos por humedad, los tratamientos AA y CC presentan valores significativamente menores a 2000 kPa, mientras que, los tratamientos AC y testigo si presentaron problemas de compactación.

Otro aspecto relevante es que para los primeros 5 centímetros de suelo, realizar o no la corrección por humedad es indiferente, ya que se observó que no se llega al umbral, por lo tanto, no habrá problemas por compactación. Por otra parte, para los siguientes 5 cm (5 a 10 cm) si es necesario corregir por humedad, esto se debe a que, si no se corrige, todos los tratamientos indicarán que existen problemas de compactación en el suelo. Podríamos inferir entonces que las diferencias se observan a una mayor profundidad debido al tiempo transcurrido entre el ensayo y las mediciones, tanto la arena como el compost fueron incorporándose en profundidad en el suelo a lo largo del tiempo.

Los tratamientos que no tuvieron problemas de compactación se presentaban sobre suelos con mejores propiedades que determinan características del suelo superiores. Las parcelas tratadas con top dressing de arena, presentan una menor compactación de suelo principalmente explicado por un cambio en el porcentaje total de poros y un aumento de macroporos del suelo, mejorando el intercambio gaseoso y la disponibilidad de agua en el suelo, favoreciendo así el desarrollo radicular (Giuliani et al., 2024).

Por otro lado, el tratamiento con compost tampoco presenta problemas de compactación de 5 a 10 cm, esto puede deberse a diferentes razones, una de ellas puede ser la mineralización que se produce en las enmiendas orgánicas (Monsalve et al., 2017). El aporte de materia orgánica genera una mejora y reactivación de los microorganismos presentes en conjunto con sus procesos biológicos, provocando una descompactación del suelo (Miller et al., 2004).

Las mejoras en las propiedades físicas del suelo por parte del compost que derivan en una disminución de la compactación son numerosas, por un lado, el uso de compost sobre el suelo mejora el agregado y la estabilización de este, su estructura además de reducir la densidad aparente (Evanylo et al., 2016). Un aumento en la porosidad total y una mejora en la distribución de los tamaños de los poros (Logsdon y Malone, 2015). Por otro lado, Endriani y Listyarini (2023) indican que la aplicación de compost reduce la resistencia a la penetración del suelo principalmente en los primeros diez centímetros del perfil del suelo.

El agregado de enmiendas orgánicas y/o compost, es un agregado de materia orgánica, esto acarrea una serie de consecuencias benéficas para el suelo y el césped, como, por ejemplo, reducir la dureza del suelo y su densidad aparente (Merino y Ansorena, 1998). Además, Álvarez (2006) indica que el agregado de abonos al suelo también aporta al desarrollo de la fauna edáfica (bacterias, nematodo, actinomicetos, hongos, protozoos, etc), provocando canales de drenaje, descompactación, aumento de la macroporosidad y la aireación, mejorando la compactación del suelo tratado.

Por lo tanto, podemos ver que los resultados obtenidos respaldan los beneficios de la aplicación de los compost explicados por varios autores como, Merino y Ansorena (1998), Álvarez (2006), Bilgili et al. (2011), así como también coinciden con los resultados obtenidos por Endriani y Listyarini (2023), Evanylo et al. (2016) y Bondí et al.

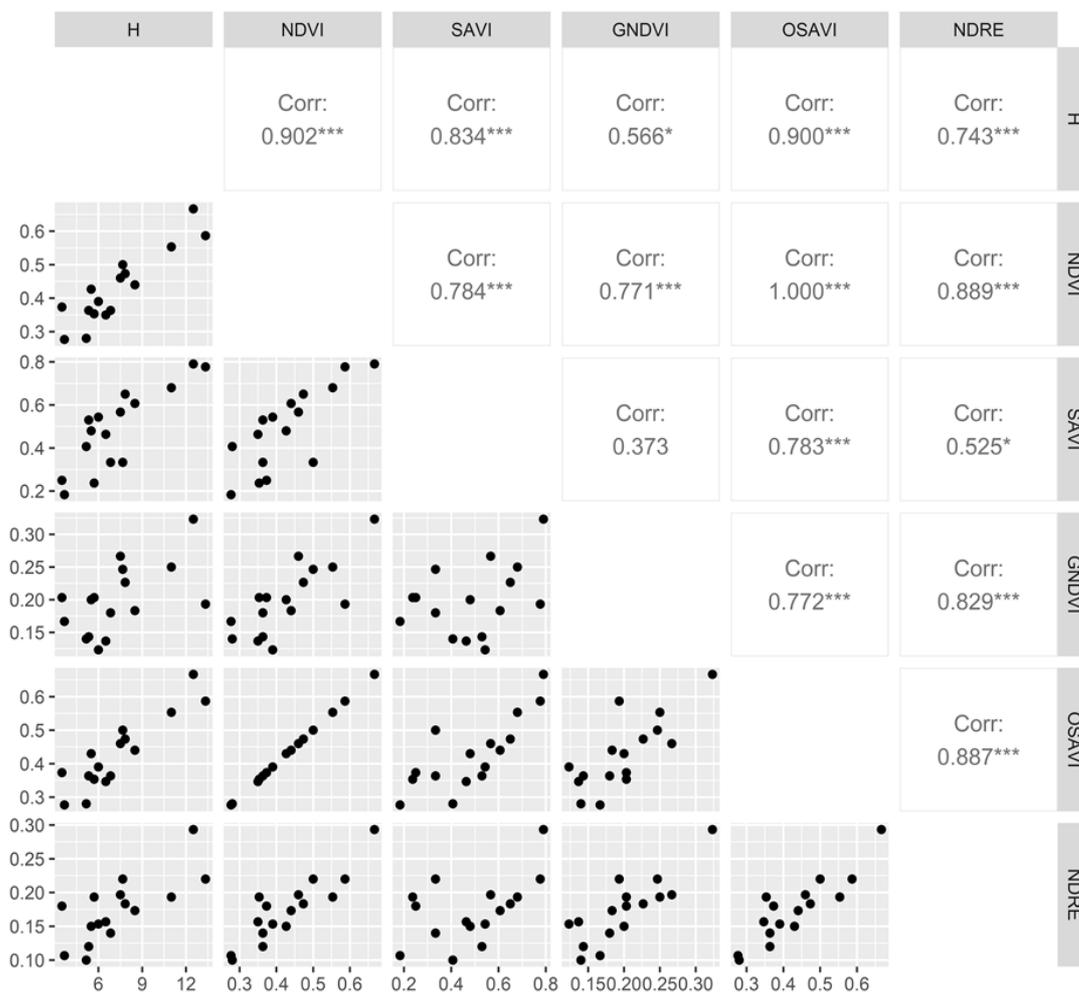
(2024), que la aplicación de compost, abonos y enmiendas orgánicas reducen la resistencia a la penetración y la compactación del suelo.

Por último, tanto el testigo y el tratamiento AC, presentan problema de compactación. Para el testigo se adjudica a las características del suelo del lugar, por su parte el tratamiento AC, podemos explicar estos resultados a partir de la interacción al aplicarse en conjunto con las partículas finas presentes en el compuesto y gruesas de la arena. Alnmr y Ray (2021) explican que las partículas de arena interactúan con la matriz de arcilla (conformado por partículas finas) formando sedimentos lo cual inducirá a una compactación del suelo. Por otro lado, Merino y Ansorena (1998) explica que la combinación de de enmiendas orgánicas con arena pura, puede acarrear problemas debido a una reducción en la aireación y el drenaje por el bloqueo de los macroporos de la arena, estas razones explicarían porque el agregado de este tratamiento en proporciones similares no generaría un beneficio en cuanto a la compactación del suelo. Observando las barras de error, AC muestra una dispersión mayor (errores más grandes) que AA, lo que sugiere mayor variabilidad en los datos de AC. Una alta variabilidad puede enmascarar diferencias entre las medias, ya que la prueba de Tukey se vuelve menos sensible en presencia de ruido en los datos.

4.3 BIOENSAYO

En primer lugar, se seleccionó el índice que presentó mayor correlación con la altura, a los efectos de esta investigación, el índice seleccionado fue NDVI.

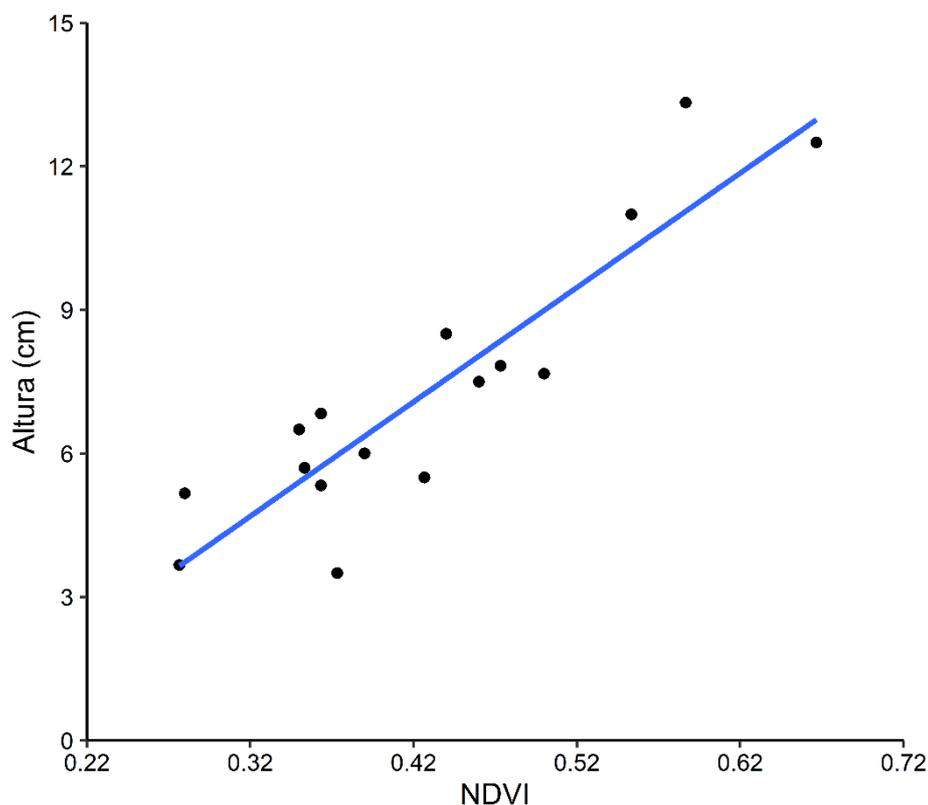
Figura 9
Correlación entra altura (H) e índices espectrales



En la siguiente figura podemos observar la alta relación entre la altura y los distintos índices, en especial el NDVI. En este sentido, si los valores son altos (más cercanos a 1, más ajustado), se considera que las variables tienen una relación fuerte y directa, y que la ecuación obtenida representa adecuadamente la relación cuantitativa entre las variables, por lo que se puede aplicar para determinar una de ellas conociendo las demás (Martínez Rodríguez, 2005) es decir, conociendo los datos de altura se pueden predecir de los índices espectrales correspondientes.

Figura 10

Relación lineal entre la altura y el NDVI



Observando la tabla número 5 se puede ver la altura alcanzada por el césped para los distintos tratamientos. La mayor altura se obtuvo en el tratamiento CC seguido por AA, AC y el testigo respectivamente. Estadísticamente, el tratamiento CC es significativamente mayor a los demás, los tratamientos AC y TT son los de menor registro y no muestran diferencias entre sí, por último, el tratamiento AA tiene un efecto intermedio y no es significativamente diferente a los demás.

Tabla 5

Análisis por tratamiento y altura

Tratamiento	Altura (cm)	n	E.E	Test de Tukey
CC	13.33	3	1.24	A
AA	8.5	3	1.24	AB
AC	6.5	3	1.24	B
T	6	3	1.24	B

Nota. Letras diferentes representan diferencias significativas.

Como podemos ver en la tabla que se presenta a continuación, el tratamiento de compost contiene nutrientes como NPK y materia orgánica, su agregado puede llevar a un aumento de los nutrientes mencionados y de la materia orgánica. Esto puede provocar mejoras en el desarrollo vegetal, como se explica en los resultados obtenidos por otros autores como donde las plantas que agregan nitrógeno presentan mayores

valores de NDVI, mayor altura, cobertura y desarrollo. Así como también en los resultados presentados por Boiarskii y Sinegovskii (2022) así como también por Orrico Junior et al. (2018) donde a mayores dosis de compost (lo que implica un mayor contenido de N) los céspedes presentaban mayor rendimiento de materia seca, mayores tasas de crecimiento y mejor composición química. Además, como explican Vaughn et al. (2015), el uso de compost aumenta la retención de agua y nutrientes, lo que también podría explicar la mayor altura en este tratamiento.

Tabla 6
Análisis químico de compost

Parámetro	Promedio	Máximo	Mínimo
Materia orgánica	28.4	41.0	22.8
Nitrógeno total	1.6	2.1	1.1
Fósforo total	0.9	1.1	0.5
Fósforo Bray	252	407	119
Potasio total	0.6	1.2	0.3
Humedad (OUA)	38.9	42.9	36.3
Conductividad	0.8	1.8	0.3
pH	7.3	7.8	6.6

Nota. Tabla elaborada a partir de datos aportados por Tresaor (comunicación personal, 2023).

El posible agregado de fósforo por parte del compost genera un beneficio para las raíces del césped, resultados como los de Van der Bom et al. (2023), indican que el fósforo mejora el crecimiento de las plantas y el tamaño de las raíces, al hacerlo, aumenta la exploración (profunda) del suelo, además los datos obtenidos sugieren que la nutrición con P genera proliferación de raíces plásticas ayudaron a generar beneficios para el crecimiento de los cultivos.

Otro aspecto clave es el agregado de materia orgánica por parte del compost, debido a un almacenamiento y suministro de los macro y micronutrientes, incrementa la capacidad de intercambio catiónico, regula los niveles de pH, estabiliza y mantiene las partículas del suelo en forma de agregados, mejora la capacidad del suelo para retener agua, reduce la compactación del mismo y aumenta la friabilidad del suelo lo que permite un mejor crecimiento de las raíces, por último es la fuente de carbono y energía para los microorganismos del suelo que reciclan los nutrientes (Docampo, s.f.). Este factor podría explicar el resultado obtenido, donde el césped que crecía sobre un sustrato de compost se encontraba más alto y más desarrollo.

En el caso de la arena, una posible explicación a los resultados obtenidos podría atribuirse a la mejora en las condiciones para el crecimiento y desarrollo de raíces. El aumento del volumen de espacios porosos junto a una disminución paulatina de la proporción de poros finos alteró la concentración iones salinos disminuyendo su presencia en la zona de las raíces, además de aumentar el espacio disponible para su desarrollo permitiendo el crecimiento con un esfuerzo makro por parte de la raíz debido a una menor compactación (Giuliani et al., 2024; León et al., 2017).

Para el caso de la arena y compost y el testigo, las no diferencias pueden deberse a que la dosis de agregado de compost sea muy poca para generar un efecto en el césped como explican los resultados obtenidos por Orrico Junior et al. (2018), y que la interacción entre las partículas finas y la arena dificulte el desarrollo de raíces en la maceta Alnir y Ray (2024).

5. CONCLUSIÓN

El presente trabajo ha demostrado la utilidad de las tecnologías y metodologías implementadas para evaluar el efecto de diferentes tratamientos de topdressing (arena, compost y su combinación) sobre el desarrollo del césped y las propiedades físicas del suelo en campos deportivos.

El uso de herramientas de teledetección, específicamente el empleo de imágenes multiespectrales obtenidas mediante drones, resultó fundamental para medir y analizar variables clave como el índice de vegetación NDVI. Estas tecnologías permitieron una evaluación precisa y no invasiva del desarrollo del césped, proporcionando un marco confiable para estudiar el impacto de los tratamientos. Los modelos ajustados basados en estos datos demostraron ser efectivos para identificar diferencias significativas en la altura del césped, destacando la capacidad de estas herramientas para apoyar decisiones agronómicas en contextos deportivos.

Por otro lado, el uso del penetrómetro para medir la resistencia a la penetración del suelo, permitió evaluar la compactación del suelo de manera cuantitativa. Este enfoque tecnológico facilitó la correlación entre el manejo del suelo y sus propiedades físicas, mostrando que los tratamientos con compost y arena redujeron significativamente la compactación, mientras que la combinación de ambos presentó desafíos que requieren ajustes futuros.

En cuanto a los tratamientos, la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos CC (compost) y AA (arena) no invalida la observación de una diferencia promedio de casi 5 centímetros en altura. Esta diferencia podría hacerse detectable con un mayor tamaño muestral o una reducción del error estándar. Por otro lado, los resultados del tratamiento AC (arena + compost) evidencian problemas en la proporción utilizada para combinar ambos materiales. El alto drenaje asociado a la arena pudo haber favorecido la lixiviación de nutrientes, limitando su impacto positivo en el desarrollo del césped, mientras que una proporción elevada de arena parece haber restringido la formación de agregados estables, reduciendo los efectos benéficos del compost.

Para finalizar; el trabajo realizado reafirma la importancia de integrar tecnologías avanzadas y metodologías rigurosas en la investigación aplicada al manejo del césped deportivo, contribuyendo al desarrollo sostenible de estos sistemas y ofreciendo una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Al-Gaadi, K. A. (2012). Employing electromagnetic induction technique for the assessment of soil compaction. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 7(4), 425-434. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2012.425.434>
- Alnmr, A., & Ray, R. P. (2021). Review of the effect of sand on the behavior of expansive clayey soils. *Acta Technica Jaurinensis*, 14(4), 521-552. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00611>
- Alnmr, A., & Ray, R. (2024). Investigating the impact of varying sand content on the physical characteristics of expansive clay soils from Syria. *Geotechnical & Geological Engineering*, 42(4), 2675-2691. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02698-w>
- Álvarez, M. (2006). *Césped: Una guía esencial para el cuidado y la renovación de todo tipo de jardines*. Albatros.
- Arocena, F. (Coord.), Cristiano, J., Domínguez, P., Paternain, R., & Traverso, D. (2018). *¿Qué significa el fútbol en la sociedad uruguaya? Resumen ejecutivo y conclusiones finales*. Universidad de la República. <https://psico.edu.uy/sites/default/files/2018-06/Resumen%20ejecutivo%20y%20Conclusiones%20finales%20-%20El%20significado%20del%20f%C3%BAbol%20en%20la%20sociedad%20uruguaya.pdf>
- Barlocco, M., Quimbo, C., & Sena, N. (2014). *Prevención de lesiones de rodilla en juveniles del fútbol profesional uruguayo* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/20510>
- Bentancor Méndez, M., Delgado Rivero, M., & Foderé Carbajal, M. (2009). *Viabilidad de los clubes de fútbol en el Uruguay* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/358>
- Bero, N. J., & Soldat, D. J. (2022). Effect of topdressing of compost, compost tea, and various fertilizers on soil and lawn characteristics. *International Turfgrass Society Research Journal*, 14(1), 110-120. <https://doi.org/10.1002/its2.101>
- Bilgili, U., Topac-Sagban, F. O., Surer, I., Caliskan, N., Uzun, P., & Acikgoz, E. (2011). Effects of wastewater sludge topdressing on color, quality, and clipping yield of a turfgrass mixture. *HortScience*, 46(9), 1308-1318. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.9.1308>
- Boiarskii, B., & Sinegovskii, M. (2022). Application of NDVI and NDRE vegetation indices in the assessment of soybean productivity under nitrogen controlled-release fertilizer. En Institute of Electrical and Electronics Engineers (Ed.), *VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology* (pp. 92-97). <https://doi.org/10.1109/ITNT55410.2022.9848588>
- Bondí, C., Castellini, M., & Iovino, M. (2024). Temporal variability of physical quality of a sandy loam soil amended with compost. *Biología*, 79(4), 512-523. <https://doi.org/10.1007/s11756-024-01637-1>

- Burbrink, C., & Straw, C. (2023). Spatiotemporal variability of a stadium football pitch during a professional tournament. *Sports Engineering*, 26, Artículo e8. <https://doi.org/10.1007/s12283-023-00399-4>
- Confederación Sudamericana de Fútbol. (2019). *Guía básica preparación canchas*. <https://cdn.conmebol.com/wp-content/uploads/documents/guia-basica-preparacion-canchas-conmebol-2019-esp.pdf>
- Dagnino, J. (2014). La distribución normal. *Revista Chilena de Anestesia*, 43(2), 116-121. <https://revistachilenadeanestesia.cl/P11/revchilanestv43n02.08.pdf>
- De la Cruz, F. (2008). Modelos multinivel. *Revista Peruana de Epidemiología*, 12(3), 1-8. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=203120335002>
- Díaz, S., Lozano, Y., Trinidad, M., Flores, G., & Piña, D. (2022). Integración de una cámara multiespectral y aprendizaje automático para clasificación de manzanas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 13(4), 1-13. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2022.23.4.031>
- Dirección de Suelos y Fertilizantes. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Vol. 3. Descripciones, datos físicos y químicos de los suelos dominantes*. MAP.
- Docampo, R. (s.f.). La importancia de la materia orgánica del suelo y su manejo en producción frutícola. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Seminario de actualización técnica: Frutales de pepita* (pp. 81-88). <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/1199/1/128221131113111309.pdf>
- Duarte, T. F., Da Silva, T. J. A., Bonfim-Silva, E. M., & Fenner, W. (2020). Resistance of a red latosol to penetration: Comparison of penetrometers, model adjustment, and soil water content correction. *Engenharia Agrícola*, 40(4), 462-472. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n4p462-472/2020>
- Duarte, T. F., Da Silva, T. J. A., Bonfim-Silva, E. M., & Lima, G. F. (2022). Simple correction method of soil penetration resistance for soil water content. *Engenharia Agrícola*, 42(3), Artículo e20210229. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42n3e20210229/2022>
- El-Hendawy, S., Al-Suhaibani, N., Dewir, Y., Elsayed, S., Alotaibi, M., Hassan, W., Refay, Y., & Tahir, M. (2019). Ability of modified spectral reflectance indices for estimating growth and photosynthetic efficiency of wheat under saline field conditions. *Agronomy*, 9(1), Artículo e35. <https://doi.org/10.3390/agronomy9010035>
- Endriani, E., & Listyarini, D. (2023). Effectiveness combination of leucaena compost and coconut shell biochar on reduce soil compaction and corn growth in ultisol. *BIO Web of Conferences*, 80, Artículo e03007. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20238003007>
- Evanylo, G. K., Porta, S. N., Li, J., Shan, D., Goatley, J. M., & Maguire, R. (2016). Compost practices for improving soil properties and turfgrass establishment and quality on a disturbed urban soil. *Compost Science & Utilization*, 24(2), 136-145. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2015.1096866>

- Federación Internacional de Fútbol Asociación. (2023). *FIFA natural turf guidelines*. <https://digitalhub.fifa.com/m/13a9ba8e47d968ea/original/FIFA-Natural-Turf-Guidelines.pdf>
- Ferré, A. (2015). *Almácigo: Kit para aprender a sembrar* [Tesis de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/4744>
- Galieni, A., D'Ascenzo, N., Stagnari, F., Pagnani, G., Xie, Q., & Pisante, M. (2021). Past and future of plant stress detection: An overview from remote sensing to positron emission tomography. *Frontiers in Plant Science*, 11, Artículo e609155. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.609155>
- García-García, J. A., Reding-Bernal, A., & López-Alvarenga, J. C. (2013). Cálculo del tamaño de la muestra en investigación en educación médica. *Investigación en Educación Médica*, 2(8), 217-224. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-50572013000400007&lng=es&tlng=es
- García Préchac, F., Durán, A., Califra, A., & Hill, M. (s.f.). *Propiedades hídricas del suelo*. Universidad de la República. <https://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+hidricas+del+suelo.pdf>
- Giuliani, L. M., Hallett, P. D., & Loades, K. W. (2024). Effects of soil structure complexity to root growth of plants with contrasting root architecture. *Soil and Tillage Research*, 238, Artículo e106023. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106023>
- Google. (2023). [Complejo Deportivo Sebastián Bauzá, Montevideo, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 23 de junio de 2023, de <https://www.google.com/maps/place/Club+Atl%C3%A9tico+Bella+Vista+-+Complejo+Deportivo+Sebasti%C3%A1n+Bauz%C3%A1/@-34.8628002,-56.3120982,645m/data=!3m2!1e3!4b1!4m6!3m5!1s0x95a1d68a5294a24b:0x1b972fdb9899c07!8m2!3d-34.8628046!4d-56.3095233!16s%2Fq%2F1tdzh4xk?entry=ttu>
- Haug, R. T. (1993). *The practical handbook of compost engineering*. CRC Press.
- Heidarian Dehkordi, R., Burgeon, V., Fouché, J., Gomez, E., Cornelis, J. T., Nguyen, F., Denis, A., & Meersmans, J. (2020). Using UAV collected RGB and multispectral images to evaluate winter wheat performance across a site characterized by century-old biochar patches in Belgium. *Remote Sensing*, 12(15), Artículo e2504. <https://doi.org/10.3390/rs12152504>
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. Academic Press.
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (2010). *Forrajeras catálogo de cultivares 2010*. <http://www.inia.org.uy/productos/cvforrajeras/catalogo2010.pdf>
- Johnson, A. W., & Sallberg, J. R. (1960). *Factors that influence field compaction of soils: Compaction characteristics of field equipment*. Highway Research Board. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/272/272.pdf>

- Kimura Hayama, E. T., Alexánderson Rosas, A., Vázquez-Lamadrid, E., Pale, R., Talayero Petra, J. A., Cruz Garcavilla, P., Sierra Fernández, C., García-Rojas Castillo, L., Rodríguez Valero, M., Menéndez Ramírez, G., Herrera Zarza, M., Armas de Ávila, M., & González, A. (2007). Tomografía computada multidetector de arterias coronarias: Estado del arte: Parte I: Aspectos técnicos. *Archivos de Cardiología de México*, 77(2), 137-149. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-99402007000200007&lng=es&tlng=es
- León, M. F., Silva, S. I., Sandoval, A., Aracena, I., Quiñones, F., & León-Lobos, P. (2017). El manejo del suelo salino usando arena afecta el crecimiento de raíces y la sobrevivencia de plántulas de *Prosopis tamarugo* Phil. (Fabaceae). *Gayana. Botánica*, 74(1), 158-166. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432017005000320>
- Logsdon, S. D., & Malone, R. W. (2015). Surface compost effect on hydrology: In-situ and soil cores. *Compost Science & Utilization*, 23(1), 30-36. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2014.949909>
- Martínez Rodríguez, M. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*, 38, 315-332. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1143023>
- Merino, D., & Ansorena, J. (1998). *Césped deportivo: Construcción y mantenimiento*. Mundi-Prensa.
- Miller, R. E., Colbert, S. R., & Morris, L. A. (2004). *Effects of heavy equipment on physical properties of soils and on long-term productivity: A review of literature and current research*. National Council for Air and Stream Improvement. <https://www.ncasi.org/wp-content/uploads/2019/02/tb887.pdf>
- Monje Jiménez, R. J. (2006). *Manejo de céspedes con bajo consumo de agua* (2ª ed.). Junta de Andalucía.
- Monsalve, O. I., Gutiérrez, J. S., & Cardona, W. A. (2017). Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo: Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 200-209. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5663>
- Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A., & Safadoust, A. (2004). *Corn root length density as affected by soil physical properties due to different manure and short-term tillage systems* [Contribución]. CIGR International Conference, Beijing. https://www.researchgate.net/publication/271522334_Corn_root_length_density_as_affected_by_soil_physical_properties_due_to_different_manure_and_short-term_tillage_systems
- Orrico Junior, M. A. P., Da Silveira, A. P., Orrico, A. C. A., Schwingel, A. W., Camavali, P. L., & Alves, D. C. (2018). Use of organic compost for the fertilization of Piatã and Paiaguás grasses: Effects of dose on morphogenetic, structural, nutritional, and productive characteristics. *Compost Science & Utilization*, 26(3), 201-208. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2018.1457998>

- Parracia, A. N. (2012). *Césped: Principales especies, manejo y métodos de propagación usados en parques y jardines* [Trabajo final de grado, Universidad Católica Argentina]. Repositorio Institucional UCA.
<https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/459>
- Pellegrino Beltramini, C. (2002). *Glosario de términos utilizados en el cultivo del césped*. Universidad de la República.
- Peña-Barragán, J. M., de Castro-Megías, A. I., Torres-Sánchez, J., & López-Granados, F. (2013). *Imágenes multiespectrales procedentes de un vehículo aéreo no tripulado (UAV): Una innovación tecnológica para la detección de malas hierbas en fase temprana* [Contribución]. XIV Congreso de la Sociedad Española de Malherbología, Valencia.
https://www.researchgate.net/publication/262001043_Imagenes_multiespectral_es_procedentes_de_un_vehiculo_aereo_no_tripulado_UAV_Una_innovacion_tecnologica_para_la_deteccion_de_malas_hierbas_en_fase_temprana
- Pinzón-Gómez, L. P., Álvarez-Herrera, J. G., & Mesa-Amezquita, A. (2016). Study of the spatial variability of moisture and compaction in soils with different plant covers. *Agronomía Colombiana*, 34(3), 355-363.
<https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n3.59984>
- Roy-García, I., Rivas-Ruiz, R., Pérez-Rodríguez, M., & Palacios-Cruz, L. (2019). Correlación: No toda correlación implica causalidad. *Revista Alergia México*, 66(3), 354-360. <https://doi.org/10.29262/ram.v66i3.651>
- Rucks, L., García, F., Kaplan, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades físicas de los suelos*. Universidad de la República.
<https://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>
- Straw, C. M., Samson, C. O., Henry, G. M., & Brown, C. N. (2020). A review of turfgrass sports field variability and its implications on athlete–surface interactions. *Agronomy Journal*, 112(4), 2401-2417.
<https://doi.org/10.1002/agj2.20193>
- Tencza, B. (2014). *Managing and protecting quality turfgrass areas: Assessing the impact of leaf compost topdressing on organically managed athletic fields and evaluating the effects of portable roadway systems on turfgrass performance and soil physical properties* [Tesis de maestría, University of Connecticut]. Digital Commons @ UConn. https://opencommons.uconn.edu/gs_theses/667
- Théau, J. (2008). Temporal resolution. En S. Shekhar & H. Xiong (Eds.), *Encyclopedia of GIS* (pp. 1150-1151). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-35973-1_1376
- Thomas, R. (1976). *Los céspedes*. Mundi-Prensa.
- Valdivia, R. V. (2009). *Proyecto de una multicancha tipo con terminación de césped sintético para la ciudad de Valdivia* [Trabajo final de grado, Universidad Austral de Chile]. Cybertesis.
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2009/bmfcir893p/doc/bmfcir893p.pdf>

- Van der Bom, F. J. T., Williams, A., Borrell, A. K., Raymond, N., & Bell, M. J. (2023). Phosphorus management is key to effective deployment of root ideotypes in complex soil environments. *Plant and Soil*, 489(1-2), 323-340. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06020-8>
- Van Zyl, E., & Hoffman, E. (2019). Root development and the performance of grapevines in response to natural as well as man-made soil impediments. En International Viticulture and Enology Society (Ed.), *Proceedings of 21st GiESCO International Meeting: A Multidisciplinary Vision towards Sustainable Viticulture* (pp. 108-116). <https://ives-openscience.eu/4101/>
- Vaughn, S., Dinelli, D., Tisserat, B., Joshee, N., Vaughan, M., & Peterson, S. (2015). Creeping bentgrass growth in sand-based root zones with or without biochar. *Scientia Horticulturae*, 197, 592-596. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.10.021>