

INTRODUCCIÓN

La resistencia a la penetración es un indicador del nivel de compactación de un suelo. La compactación limita el crecimiento radicular y la cantidad de aire y agua de que disponen las raíces (CIMMIYT, 2013)

Cabe señalar que todos los penetrómetros son sensibles a las diferencias que existen en la humedad, densidad aparente y la textura del suelo, razón por la cual es aconsejable medir también estas características al emplear un penetrómetro. (CIMMIYT, 2013)

La compactación del suelo se define como la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa de suelo, debido a fuerzas externas que actúan sobre él en condiciones naturales (sin intervención antrópica) se pueden encontrar en el suelo horizontes con diferentes grados de compactación, lo que se explica por las condiciones que dominaron durante la formación y la evolución del suelo; sin embargo, es bajo condiciones de uso agrícola intensivo que este fenómeno se acelera y llega a producir serios problemas en el desarrollo de las plantas cultivadas.

Los principales factores en la actividad agrícola que tienen incidencia en la compactación son:

- Implementos de labranza en el suelo
- Cargas producidas por neumáticos de tractores e implementos de arrastre

De los dos factores principales que tienen incidencia en la compactación de suelos habría que prestarle mayor atención a la compactación producida por el uso de maquinaria agrícola. Las grandes superficies cultivadas llevaron a productores y fabricantes de maquinarias agrícolas a tener la necesidad de emplear máquinas cada vez más grandes y de mayor capacidad de trabajo, sin prestarle atención a la mayor presión que ejercen los neumáticos en los sitios de los lotes en que estos implementos se usan.

Se puede decir que la estructura de suelo ideal se compone de un 50% del suelo, 25% de espacio de agua y 25% del espacio con aire. (Pioneer, 2012)

Las raíces necesitan agua y oxígeno para poder desarrollarse, y además debe existir un espacio poroso adecuado entre las partículas del suelo por el que puedan ir creciendo. El principal obstáculo con el que se puede encontrar la raíz en su crecimiento es el impedimento mecánico que puede deberse tanto a la presencia de rocas u horizontes muy pedregosos a poca profundidad, como a la presencia de capas de suelo endurecidas o compactadas, en las cuales la densidad es alta y existen pocos espacios entre las partículas.

Conforme va aumentando la densidad del suelo, el crecimiento de las raíces va requiriendo un mayor gasto de energía y su desarrollo va siendo afectado, pudiendo verse totalmente impedido si la compactación es excesiva. (Zaballos, 2006)

La Industria Agrícola de Bermejo S.A., es el principal Ingenio Azucarero de Tarija, se encuentra a 190 km. de la ciudad Capital; Ubicada en la localidad del mismo nombre, Bermejo, fronteriza con Argentina, provee de azúcar al sur de Bolivia y es generadora de una inusitada actividad y empleo en la región tarijeña donde está ubicada.

Directa e indirectamente emplea alrededor de más de 12 mil personas entre zafreiros, cañeros, cargadores, transportistas, comerciantes, sin contar toda la gama del rubro de gastronomía, según informó el Presidente del Ingenio azucarero Pastor Ferreira Torres. (IBCE, 2011)

PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

Descompactar el suelo por debajo de la profundidad de arada normal es un problema cuya resolución, o al menos disminución, es siempre de alta inversión y trabajo, generalmente complicado técnicamente por las altas demandas de potencia y equipos de labranza menos frecuentes y a veces imposible de resolver en términos económicamente viables. Si a esto se suma el hecho de que todos los agentes naturales que favorecen la descompactación tales como: alternancia de ciclos de humedad-sequía, congelamiento-descongelamiento, actividad biológica, acumulación de materia orgánica, labranza, prácticas de manejo del suelo, disminuyen su participación en la

medida que descienden en el perfil del suelo, estamos frente a un problema acumulativo, incrementándose, o al menos manteniéndose, de un ciclo productivo al siguiente.

JUSTIFICACIÓN:

Se justifica la presente investigación por que, el estudio de las propiedades físicas del suelo tiene un papel preponderante en la caracterización de su productividad. En particular, la compactación afecta negativamente tanto en forma directa como indirecta a diversas propiedades del suelo como la estructura, la dinámica del agua y el aire, así como procesos de oxidación reducción y poblaciones de organismos, por citar solo algunos ejemplos. La compactación del suelo es un empaquetamiento de las partículas que constituyen la fracción sólida, lo que se traduce en una disminución del espacio poroso total y consecuentemente, en un aumento de la densidad aparente, al ocurrir esto, también se restringe el desarrollo radical.

Con el presente trabajo se tiene previsto determinar si existe compactación en los suelos del módulo agrícola, un estudio de este tipo brindara información de gran utilidad que podría ser empleada para mejorar el estado de los suelos en la actualidad.

OBJETIVOS

Objetivo general:

- Determinar la resistencia a la penetración en el suelo, con la finalidad de saber si existe compactación en los suelos del Módulo Agrícola del Ingenio Azucarero de Bermejo

Objetivos específicos:

- Elaborar mapas de dureza, con el objeto de localizar sectores de incidencia
- Interpretar los resultados obtenidos para dar a conocer el nivel de dureza del suelo, así prevenir pérdidas y saber si el terreno requiere de mejoras a nivel del suelo para realizar alguna enmienda

HIPÓTESIS

Los suelos del Módulo Agrícola del Ingenio Azucarero de Bermejo presentan mayor grado de compactación mientras el uso de maquinaria agrícola sea más frecuente.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. El suelo

El suelo está compuesto por minerales, materia orgánica, diminutos organismos vegetales y animales, aire y agua. Es una capa delgada que se ha formado muy lentamente, a través de los siglos, con la desintegración de las rocas superficiales por la acción del agua, los cambios de temperatura y el viento. Las plantas y animales que crecen y mueren dentro y sobre el suelo son descompuestos por los microorganismos, transformados en materia orgánica y mezclados con el suelo.

- Los minerales provienen de la roca madre, que se deshace lentamente. También pueden ser aportados por el viento y el agua, que los arrastran desde otras zonas erosionadas.
- La materia orgánica es el producto de la descomposición de vegetales y animales muertos. Puede almacenar gran cantidad de agua y es rica en minerales.
- Los microorganismos o pequeños organismos son de dos tipos: los que despedazan la materia orgánica (insectos y lombrices) y los que la descomponen liberando los nutrientes (hongos, bacterias). Viven dentro del suelo y, además de intervenir para que la materia orgánica sea nuevamente utilizada por las plantas, ayudan a pulverizar las rocas. Lombrices e insectos forman poros que permiten la aireación, el almacenaje del agua y el crecimiento de las raíces.
- Agua y aire ocupan los poros, espacios entre las partículas de suelo que se producen por las irregularidades de su forma y tamaño. La distribución y tamaño de los poros es importante. Una excesiva cantidad de poros pequeños origina suelos compactos, pesados, húmedos y un pobre crecimiento de las raíces. Demasiados poros grandes forman suelos sueltos que se secan rápidamente. Cuando más pequeño es el poro, más difícil es para la planta absorber agua de él. Los organismos del suelo y las plantas necesitan agua para

vivir. Las plantas la utilizan para mantener sus tejidos, transportar nutrientes y realizar la respiración y nutrición. El agua del suelo es absorbida por las raíces y utilizada en el proceso de fotosíntesis. La disolución de minerales y materia orgánica en el agua facilita que sean captados por las plantas. Cuando el agua del suelo escasea, se detiene el crecimiento de las plantas, que llegan a marchitarse y morir. Un exceso de agua desplaza el aire del suelo. Este es importante porque aporta oxígeno para la respiración de las raíces. Además, es la fuente del nitrógeno que transforman las bacterias, haciéndolo aprovechable por las plantas.

En el suelo se multiplican miles de formas de vida, la mayoría invisibles para nuestros ojos. Una hectárea de tierra fértil puede contener más de 300 millones de pequeños invertebrados: insectos, arañas, lombrices y otros animales diminutos. La tierra que cabe en una cuchara puede encerrar un millón de bacterias, además de cientos de miles de células de levaduras y pequeños hongos. Todas las sustancias que forman el suelo son importantes por sí mismas, pero lo fundamental es el equilibrio adecuado entre los diferentes constituyentes.

La materia orgánica y los microorganismos aportan y liberan los nutrientes y unen las partículas minerales entre sí. De esta manera, crean las condiciones para que las plantas respiren, absorban agua y nutrientes y desarrollen sus raíces. Lombrices, bacterias y hongos también producen humus, que es una forma estable de materia orgánica. El humus retiene agua y nutrientes y ayuda a prevenir la erosión.

En resumen, el manejo sostenible del suelo debe estimular la actividad de los microorganismos, manteniendo o aportando una cantidad adecuada de materia orgánica. (Ávila, 2015)

1.1.2. Factores relacionados con el suelo

Características físicas y propiedades mecánicas del suelo (textura, tipo y estabilidad de la estructura, densidad aparente, carga histórica, resistencia a la deformación).

Contenido de humedad del suelo: a mayor contenido de humedad, el suelo puede

deformarse y compactarse con menores presiones recibidas. Por lo tanto, las labores deben realizarse con el suelo lo más seco posible. (AGRO, 2013)

1.1.3. Definición de compactación

Incremento en densidad y disminución de macro-porosidad en el suelo que perjudica las funciones del mismo e impide la penetración de las raíces y el agua y el intercambio gaseoso.

La compactación del suelo puede reducir el rendimiento agrícola hasta un 60%. La mala gestión agrícola (80%) y el sobrepastoreo (16%) son las dos principales causas antrópicas de compactación 4% de la superficie terrestre global se estima compactada. (FAO, 2016)

1.1.3.1. Tipos de compactación del suelo

1.1.3.1.1. Compactación superficial

Disminución del volumen de macroporos producido dentro del horizonte arable anualmente (Ap).

1.1.3.1.2. Compactación sub superficial

Disminución del espacio poroso inducida por debajo del Ap por transmisión de las presiones que el rodado ejerce sobre el suelo.

La primera proviene de las labores posteriores a la labranza primaria y puede afectar a ese ciclo del cultivo. Con la nueva labor fundamental se restituirá el volumen de poros perdidos en el ciclo debido a labranza y tránsito. En cambio, la compactación subsuperficial tiene como gran desventaja la de ser acumulativa, ya que el ciclo de labores convencionales no involucra esos horizontes. Además, al ubicarse a mayor profundidad recibe mucho más atenuados los efectos de los agentes descompactadores naturales, tales como ciclos helada-descongelamiento, seca-humedad y la actividad biológica de raíces e insectos. La intervención del hombre para solucionarlas tendrá en cada caso unos costos muy diferentes. (Jorajuria & Balbuena, 2006)

1.1.3.1.3. Compactación y sellamientos superficiales del suelo

La compactación y sellamientos superficiales del suelo corresponden, a fenómenos localizados superficialmente que se forman en el caso de compactación, como consecuencia del tráfico frecuente de la maquinaria que causa compresión directa del

suelo, y pisoteos debido a labores realizadas por los individuos como son la cosecha, poda etc. Por otra parte, la formación del sellamiento es debido a dos procesos. En primer lugar, la desintegración física de los agregados del suelo y su compactación causados por el impacto del agua, especialmente la gota de agua, y en segundo término, la dispersión química y movimiento de las partículas de arcilla dentro del suelo, las cuales tapan los poros conductores. (PortalFruticola, 2017)

1.1.3.1.4. Compactación dentro del suelo (piso de arado)

Se conoce con el nombre de piso de arado a la dureza que se forma en el suelo unos centímetros por debajo de la superficie. Ella suele formarse por el laboreo del suelo, en forma reiterada, con la misma herramienta. Dependiendo de qué tipo de herramienta se trate es la profundidad en la que se ubicará la capa dura del suelo.

Se denomina Piso de Arado porque se daba en aquellos lotes que se trabajaban permanentemente con el arado y nunca se le alternaba una herramienta de laboreo vertical profunda como por ejemplo un cincel o subsolador.

La diferencia más evidente, si comparamos los pisos de arado del pasado con los actuales, es la profundidad en que se forman. Los de años atrás eran más profundos, ya que los arados de reja trabajan a más profundidad que una sembradora directa.

El piso de arado es tan compacto que no permite que las raíces de los cultivos los traspasen y por ende no pueden explorar el suelo que se encuentra por debajo de ellos. Además el agua de lluvia no filtra con facilidad hacia lo profundo del suelo, y si lo hace, lo hace con mucha lentitud, causando un escurrimiento superficial del agua arrastrando todo lo que encuentre.

Un suelo que posee piso de arado es como una maceta, ya que la profundidad del mismo se ve disminuida. Si el piso de arado se encuentra a los 30 centímetros, es como sembrar en una maceta de esa profundidad. Se imaginaran la poca disponibilidad de agua y nutrientes que tienen las plantas, y la oportunidad que perdemos de usar muchísimos nutrientes disponibles si consideramos que hay cultivos que pueden explorar hasta los dos metros de profundidad. Otro problema que acarrea es la caída de los cultivos, sobre

todo aquellos que crecen altos como el maíz, ya que la poca profundidad no permite un anclaje correcto.

Para evitar el piso de arado se debe hacer uso de la labranza vertical, este tipo de herramientas rompe la dureza que se forma, permitiendo que las raíces alcancen la humedad y los nutrientes ubicados en la profundidad del suelo. Además, el agua de lluvia filtrará correctamente cargando el perfil de humedad, la cual quedará disponible para los cultivos venideros. (Faiguenbaum, 2017)

1.1.3.1.5. Formación de costra superficial

La formación de una costra superficial es una forma de compactación del suelo que reduce la emergencia de las semillas y las tasas de infiltración del agua. Está provocada por el impacto de las gotas de la lluvia en las partículas de la superficie del suelo. Los impactos fuertes provocan que las partículas del suelo se tamicen juntas. Un secado rápido del suelo aumenta el potencial de formación de costra superficial. Los suelos con un alto contenido en materia orgánica o arena tienen un potencial menor de formación de costra. Los sistemas de labranza cero o labranza mínima normalmente presentan un riesgo menor de formación de costra superficial debido a una mejor estructura del suelo y mayores cantidades de residuos del cultivo en la superficie del suelo. Se pueden utilizar azadas giratorias para romper las costras y favorecer la emergencia y el establecimiento del rodal. (Lutt & Mark, 2018)

1.1.3.1.6. Compactación de las paredes laterales

En general, la compactación de las paredes laterales se deriva de sembrar en suelos que están demasiado húmedos y/o de aplicar demasiada presión en las unidades de la hilera. La acción de los abre surcos de disco de siembra que cortan en suelos húmedos puede provocar que las paredes laterales del surco de semillas se endurezcan tras la siembra. El resultado puede ser una emergencia incorrecta del cultivo y un desarrollo inadecuado de las raíces fuera del surco de siembra. Las consecuencias de un desarrollo de las raíces limitado pueden incrementarse si las condiciones son más secas y el cultivo sufre estrés por sequía a finales de la temporada. Una compactación aguda de las paredes

laterales redujo el rendimiento en un 50 % en una demostración extensiva realizada por la Universidad de Kentucky. (Lutt & Mark, 2018)

1.1.3.1.7. Suela de labor

La suela de labor es una capa de compactación del subsuelo de pocos centímetros de grosor por debajo de la zona normal de labranza. Este tipo de compactación está provocada por la labranza repetida a la misma profundidad, en especial, con accesorios de labranza que cortan y comprimen el suelo en la parte superior de la capa de arado, como discos, arados de vertedera o accesorios de barrido. Una labranza profunda puede ayudar a romper la suela de labor en determinadas condiciones, pero también pueden empeorar el problema si el suelo está demasiado húmedo o inmediatamente recompactado. (Lutt & Mark, 2018)

1.1.3.1.8. Compactación profunda

La compactación profunda se produce por debajo de la zona de labranza y está provocada por cargas elevadas de los ejes de las ruedas aplicadas al suelo. Los equipos de cosecha, como carros de grano y cosechadoras, tienen cargas elevadas de los ejes y, la mayoría de las veces, son el principal causante de la compactación profunda. Las cargas pesadas pueden compactar el suelo más de 60 centímetros hacia abajo en el perfil del suelo. La compactación profunda es más difícil de eliminar y puede afectar negativamente al crecimiento y rendimiento de los cultivos durante años después de que se haya producido la compactación, por lo que la prevención es muy importante. (Lutt & Mark, 2018)

1.1.4. Análisis de los factores que propician el surgimiento y desarrollo de la compactación

1.1.4.1. Factores naturales

La naturaleza geológica del suelo caracteriza sus propiedades físicas y mecánicas, las cuales influyen en su compresibilidad y compactabilidad, estas dependen de: la textura; estructura; contenido de materia orgánica y humedad del suelo.

La compresibilidad del suelo se refiere a la facilidad con la cual decrece en volumen cuando está soportando una presión aplicada. Esta es una propiedad del suelo y es análoga al índice de compresión del suelo. (Gonzales, Herrera , & Iglesias, 2009)

1.1.4.2 Factores externos e internos

Los factores que afectan la compactación de un suelo determinado pueden ser divididos en externos e internos.

El factor externo primario es el esfuerzo de compactación aplicado al suelo, y los factores internos incluyen la distribución del tamaño de las partículas, la materia orgánica, la mineralogía y contenido de agua del suelo.

Entre los factores externos, las fuerzas aplicadas generalmente son mecánicas, siendo la principal fuente de estos, el tráfico vehicular, debido principalmente al aumento del tamaño de la maquinaria agrícola, el incremento de las masas y el incremento en el tráfico, que asisten a la mecanización de la producción agrícola han llevado a un aumento en la aplicación de estas fuerzas a los. El tractor con su gran masa y presión concentrada bajo las ruedas es tal vez el mayor factor que contribuye hacia la compactación del suelo. No solo las operaciones de riego bajo operaciones de labranza, sino también los diferentes métodos y tasas de aplicación del agua influyen en la compactación del suelo. Los aspersores tienen menos efectos nocivos en los microagregados que los riegos por inundación encontraron que la inflación del agua en el suelo bajo riego de aspersión fue hasta seis veces mayor que en el caso del riego por inundación.

En los factores internos, la compactación puede ocurrir en suelos de diferente textura, pero ciertos tipos son más susceptibles a la compactación que otros, con variables como la resistencia a la penetración, grado de compactación y contenido de humedad, donde la distribución del tamaño de la partícula es una propiedad que determina la compactabilidad. (Gonzales, Herrera , & Iglesias, 2009)

1.1.4.3. Factores antropogénicos

Dentro de los factores de origen antrópico, que provocan compactación del suelo destinado a cultivos agrícolas, el tráfico de la maquinaria es el que mayor incidencia tiene. La influencia de las máquinas agrícolas en la compactación se expresa a través de la acción de: presión sobre el suelo, peso sobre los sistemas de rodaje, número de pases, velocidad de desplazamiento y patinaje; los cuales actúan sobre las condiciones preexistentes en el terreno. (Gonzales, Herrera , & Iglesias, 2009)

1.1.4.3.1. Maquinaria agrícola

En la compactación del suelo influyen factores asociados a la maquinaria como: presión sobre el suelo, carga sobre los sistemas de rodaje, número de pases, velocidad de desplazamiento y patinaje. Varias han sido las investigaciones que muestran el incremento de la compactación al aumentar la presión media sobre el suelo. Esta depende de la rigidez, presión de inflado y superficie de contacto del neumático con el suelo, así como, de la resistencia de la superficie sobre la que se apoya

Los sistemas de rodaje por esteras potencialmente compactan menos que los sistemas de rodaje por neumáticos debido a menores esfuerzos sobre el suelo y menor riesgo de compactación del suelo.

Por su parte, la maquinaria agrícola se ha vuelto significativamente más grande y pesada en las últimas décadas, para aumentar la eficiencia en el campo (capacidad efectiva), lo que aumenta considerablemente el riesgo de compactación del suelo, por la severidad y profundidad de la zona compactada, la porosidad se reduce y algunas propiedades químicas y físicas, como el contenido de agua, la infiltración, la conductividad eléctrica, la porosidad, la aireación, el aumento de la densidad, la circulación del agua o la dureza de esta, así como un aumento de la impedancia a granel para la exploración de la raíz, son afectadas, de manera que el desarrollo de la raíz y el crecimiento del cultivo se impactan negativamente. Estos atributos físicos y químicos se describen como “propiedades del comportamiento” de la compactación del suelo, y se usan con frecuencia para servir como indicadores de esta.

La investigación sobre la compactación del suelo por el tráfico de la maquinaria agrícola, ha revelado que es probable que bajo labranza mínima el porcentaje supere el 60%, y en labranza convencional excedería el 100% durante un ciclo de cultivo y el 30% bajo labranza cero, el primer pase de una rueda causa la mayor compactación y el daño de las ruedas bajo altas cargas de los ejes se incrementa en suelos húmedos, porque reduce su dureza.

Esta acción resulta relevante porque la labranza y cosecha comúnmente necesitan hacerse en suelo húmedo.

Casi todos los neumáticos aumentan significativamente la compactación del suelo en la pista de la rueda y la intensidad de la trata desempeña un papel importante en la compactación del suelo, ya que las deformaciones pueden aumentar con el número de pasadas. (Gonzales, Herrera , & Iglesias, 2009)

1.1.4.3.2. Sistemas de labranza mecanizada

La labranza tradicional (volteo y roturación superficial) ha permitido aumentar las áreas de siembra debido al incremento de la eficiencia en las labores y al mejoramiento de las propiedades del suelo. Sin embargo, en condiciones desfavorables, ha contribuido con la degradación del suelo, siendo la capa arable la más afectada. Se estima que el 80% de los suelos agrícolas en el mundo, presentan erosión moderada a severa y 10% erosión ligera a moderada. La labranza convencional tiende paulatinamente a aumentar el desplazamiento y la densidad de los suelos, induciendo a la compactación, desestructuración y aumento de la erodabilidad, especialmente en prácticas agrícolas de nivelación, laboreo y tráfico de maquinaria pesada en condiciones de humedad alta. (Gómez Calderón & Villagra-Mendoza, 2018)

1.1.5 Degradación de la estructura del suelo (DES)

Es necesario destacar la naturaleza oculta de la degradación estructural del suelo (DES), la cual conlleva problemas específicos como un pobre crecimiento del cultivo o infiltración del agua, que pudieran ser atribuidos a otras causas. Adicionalmente, a la DES puede señalársele como culpable por un pobre desempeño del cultivo cuando de hecho no está presente. Los productores agrícolas raramente relacionan sus prácticas

de labranza con las causas de la DES, y permanecen inadvertidos de que muchas de las prácticas de subsoleo empeoran la DES. En este sentido, debido a que la compactación del subsuelo es muy persistente y las posibilidades naturales o artificiales de su aflojamiento han resultado decepcionantes, la Unión Europea la ha reconocido como una forma severa de degradación del suelo, plantea que la compactación y consolidación del suelo, acompañada por la pérdida de los poros más grandes, es el resultado de la deformación y rotura bajo carga de los agregados del suelo y poros, y conduce a una pérdida de permeabilidad para el agua y las raíces.

El suelo compactado no proporciona espacio adecuado para el almacenamiento o movimiento del aire y el agua del suelo.

Más importante aún es que los grandes poros continuos del suelo se pierden o se reducen en sus dimensiones conduciendo a un movimiento lento del agua y a una aireación reducida. El crecimiento de las raíces y de la fauna del suelo también se reduce.

A diferencia de la erosión y la salinización que dan una fuerte evidencia superficial del fenómeno, la degradación de la estructura del suelo requiere análisis físicos antes de ser revelada e identificadas su extensión, naturaleza y causa. La combinación del alto costo y la «invisibilidad» hacen de la degradación de la estructura del suelo un gran riesgo para el desafío de la seguridad alimentaria global.

En los sistemas de cultivo mecanizado el uso continuo de implementos de labranza, especialmente los arados y rastras de discos, los arados de vertedera y los rotovadores durante largos períodos, frecuentemente repercuten en la formación de pisos de arado densos que contienen pocos poros grandes capaces de ser penetrados por las raíces de los cultivos. El piso de arado se desarrolla debajo de la profundidad a la cual el suelo es labrado y con frecuencia presenta superficies superiores lisas con poros sellados causados por la acción de frotación de la reja y el talón de los arados de vertederas. El grado de compactación depende de la presión ejercida por los implementos sobre el suelo.

La naturaleza geológica del suelo caracteriza sus propiedades físicas y mecánicas, las cuales influyen en su compresibilidad y compactibilidad, estas dependen de: la textura; estructura; contenido de materia orgánica y humedad del suelo. (RODRÍGUEZ, 2020)

1.1.6. Efectos de la compactación del suelo

- **Aireación** Una de las consecuencias de la compactación es la disminución del espacio poroso, misma que afecta el intercambio gaseoso de O₂ y CO₂.
- **Movimiento del agua.** La movilidad del agua depende en gran medida de la cantidad de macroporos que tiene el suelo. La compactación del suelo disminuye la infiltración, de tal manera que, si un poro se reduce 10 veces su tamaño, la cantidad de agua que puede fluir a través del mismo en un tiempo dado será 10,000 veces menos que antes.
- **Crecimiento de las raíces.** Las raíces desempeñan un papel en la absorción de agua y nutrientes. La capacidad de penetración y exploración de la raíz se ve seriamente afectada por la compactación del suelo, debido al aumento de la resistencia del suelo y la disminución del número de macroporos. Una disminución de los poros de 0.2 a 0.3 mm de diámetro dificulta la penetración de las raíces.
- **La germinación.** La emergencia y sobrevivencia de plántulas puede ser afectada negativamente con la compactación del suelo, al no contar con las condiciones óptimas para su desarrollo.
- **Absorción de nutrientes.** En general, la compactación del suelo reduce la absorción de nutrientes debido a las raíces dañadas. Sin embargo, aumenta el contacto entre las raíces y las partículas del suelo, lo que puede favorecer la absorción de nutrientes que son interceptados. Lo anterior dependerá del tipo de suelo y la naturaleza de la compactación. (Fertilab, 2010)

1.1.6.1. Compactación potencial

Los suelos que tienen una humedad por encima de la capacidad de campo, tienen un mayor potencial para la compactación. El agua actúa como lubricante entre las partículas del suelo, lo que permite que éstas sean colocadas unas al lado de otras. A

medida que más espacio de aire se sustituye por agua, el potencial de compactación va en aumento. Hay un punto, sin embargo, cuando la mayor parte del espacio aéreo se llena de agua (cerca de la saturación) que el potencial de compactación de un suelo disminuye. Por lo tanto, un suelo muy mojado tiene menos potencial de compactación que un suelo moderadamente húmedo. La textura del suelo (% de arena, limo y arcilla en un suelo) tiene, en cierta medida, un efecto sobre la compactación. Los suelos que contienen partículas de igual tamaño tienen un menor potencial de compactación que los suelos que tienen partículas de diferentes tamaños. Las partículas más pequeñas pueden llenar los espacios entre partículas de mayor tamaño, lo que aumenta la densidad del suelo. Un suelo franco arenoso es el más susceptible a la compactación, mientras que las arenas puras, arcillas, limos, son los menos susceptibles. La estructura del suelo también juega un papel en el potencial de compactación. Esta se define como comportamiento de un suelo cuando se rompe en pequeños grupos de cohesión. La materia orgánica mejora la estructura del suelo mediante la creación de los agregados del suelo (se deshacen fácilmente). Suelos con mayores niveles de materia orgánica, en general, tienen una mejor estructura del suelo y resisten a la compactación. (Pioneer, 2012)

1.1.6.2. Síntomas y detección de la compactación del suelo

Dado que la compactación del suelo afecta el crecimiento de las raíces, los síntomas por encima del suelo pueden tomar muchas formas. Los signos de compactación pueden incluir:

- **Plantas de menor tamaño:**

Son achaparradas y de escaso crecimiento en forma aislada o pequeños grupos de plantas con esta sintomatología rodeadas de plantas normales. El marchitamiento de las plantas en ciertas áreas de un campo puede ser señal de compactación. Esto puede deberse a que los sistemas radiculares poco profundos no permiten absorber la humedad en el subsuelo

- **Malformación en el crecimiento de las raíces:**

Incluye raíces planas, cortas, delgadas y torcidas. Las raíces que crecen en un suelo con compactación subsuperficial pueden crecer más de manera horizontal que vertical y tener un sistema radicular poco profundo

- **El crecimiento por encima del suelo:**

Está directamente relacionado con el crecimiento de la raíz debajo del suelo. Si el crecimiento de raíces se ve perjudicado, el crecimiento vegetativo por encima del suelo es probable que se afecte.

- **Falta de nutrientes:**

La falta de nutrientes en los cultivos puede ser otro signo de la compactación. Ya que las raíces son las vías para que los nutrientes del suelo lleguen al cultivo, las restricciones a las raíces pueden reducir la interceptación de estas a los nutrientes en el suelo. Deficiencias del fósforo, potasio y nitrógeno, pueden ser síntomas secundarios de la compactación del suelo.

- **Agua en superficie o erosión causada por el agua:**

Pueden deberse a una compactación del suelo. Al reducirse el espacio de los poros del suelo, entonces el agua no es absorbida con la misma facilidad. Ante la sospecha de compactación, es pertinente proceder a la verificación de esas áreas compactadas, para lo cual se puede usar un penetrómetro de punta de cono. Sin embargo, esta herramienta tiene sus limitaciones para el diagnóstico, ya que la resistencia a la penetración es una función de la densidad del suelo y de la humedad del mismo. (Pioneer, 2012)

1.1.7. Impacto de la compactación del suelo

La compactación del suelo provoca la pérdida 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. Las raíces necesitan agua y oxígeno para poder desarrollarse, y además debe existir un espacio poroso adecuado entre las partículas del suelo por el que puedan ir creciendo. El principal obstáculo con el que se puede encontrar la raíz en su crecimiento es el impedimento mecánico que puede

deberse tanto a la presencia de rocas u horizontes muy pedregosos a poca profundidad, como a la presencia de capas de suelo endurecidas o compactadas, en las cuales la densidad es alta y existen pocos espacios entre las partículas. Debemos tener en cuenta que, aunque las raíces son capaces de penetrar por grietas y poros muy pequeños, las paredes de éstos deben ser capaces de ceder ante la presión ejercida por éstas. Conforme va aumentando la densidad del suelo el crecimiento de las raíces va requiriendo un mayor gasto de energía y su desarrollo va siendo afectado, pudiendo verse totalmente impedido si la compactación es excesiva. Los factores que van a tener un efecto directo sobre el crecimiento de las raíces son:

- Aumento de la resistencia mecánica del suelo
- Disminución de la macroporosidad del suelo.

El aumento de la resistencia mecánica del suelo va a restringir el crecimiento de las raíces a espacios de menor resistencia, tales como los que se ubican entre las estructuras (terrones), en cavidades formadas por la fauna del suelo (lombrices) y en espacios que se producen por la descomposición de restos orgánicos gruesos (raíces muertas). Esta situación va a producir un patrón de crecimiento característico de raíces aplanadas, ubicadas en fisuras del suelo, con una escasa exploración del volumen total. La disminución de la macroporosidad del suelo va a producir una baja capacidad de aireación y oxigenación del mismo, lo que va a producir una disminución de la actividad de las raíces y, consecuentemente, un menor crecimiento de éstas, un menor volumen de suelo explorado, una menor absorción de agua y nutrientes. Este efecto se puede agravar si se riega en forma excesiva, llegando a provocar la muerte de las raíces por asfixia. Esto es debido a que los escasos macroporos que pueden airear el suelo van a permanecer llenos de agua gran parte del tiempo. El resultado final de la compactación del suelo es un menor potencial de rendimiento en la producción de cultivos. La pérdida de rendimiento puede variar ampliamente dependiendo de la extensión de la compactación del suelo y las condiciones ambientales que afectan al cultivo durante su desarrollo. Condiciones de crecimiento favorables, tales como precipitaciones en tiempo y una óptima fertilidad, pueden minimizar los efectos de la

compactación. Una compactación severa puede causar una pérdida de rendimiento de hasta un 60%, sin embargo, se estima que en promedio la compactación reduce el potencial de rendimiento entre un 10 a 20%. (Pioneer, 2012)

1.1.8. Densidad aparente

La densidad aparente (DA) es una propiedad del suelo ampliamente utilizada en la agricultura, relacionada principalmente con las prácticas de manejo de los suelos y de las aguas. Recientemente ha aumentado la preocupación respecto a la determinación y exactitud en su medición, debido al incremento del uso de irrigación, de tierras cultivadas sin labranza y a la compactación del suelo

La D.A. es la característica que en mayor grado influye sobre la productividad de los cultivos, debido a su estrecha relación con otras propiedades del suelo. Incluso, en algunas especies ejerce un mayor efecto que el mismo uso de fertilizantes, el cual puede ser más notable cuando no se aplican estos últimos. Este comportamiento está asociado con las condiciones de disponibilidad y la tasa de difusión de los nutrientes en el suelo.

Cuando la densidad aparente del suelo aumenta, se incrementa la compactación y se afectan las condiciones de retención de humedad, limitando a su vez el crecimiento de las raíces. La DA es afectada por las partículas sólidas y por el espacio poroso, el cual a su vez está determinado principalmente por la materia orgánica del suelo - MO. A medida que aumenta la MO y el espacio poroso, disminuye la DA y viceversa. En suelos de textura fina la DA varía entre 1 y 1,2 g. cm⁻³, mientras que en suelos arenosos es mayor y puede variar entre 1,2 y 1,6g.cm⁻³. La naturaleza, las dimensiones y el arreglo de las partículas del suelo además de otros factores relacionados con su formación, también influyen sobre los valores de la DA, además de la MO y la textura del suelo, la variación de la DA está asociada con las prácticas de manejo. Cuando un suelo suelto es ligeramente compactado, la humedad volumétrica aumenta y la longitud de la ruta de difusión de los nutrientes se acorta, pero cuando un suelo se compacta, las partículas se unen a tal magnitud que la ruta de difusión se hace más tortuosa y la

solución del suelo debe moverse alrededor de las partículas, reduciendo su tasa de difusión y absorción.

(Jiménez & Khalajabadi, 2005)

1.1.8.1. La densidad aparente y el desarrollo vegetal

La densidad aparente puede ser incluida dentro de un grupo reducido de parámetros cuya medida es necesaria para evaluar la calidad de un suelo, como indicador de la estructura, la resistencia mecánica al enraizamiento y la cohesión del mismo (Doran y Parkin, 1994). Cambios en la densidad aparente reflejan cambios en la estructura del suelo, debido a la relación existente entre densidad aparente y la porosidad total.

La densidad aparente del suelo es un buen indicador de propiedades importantes del suelo, como son: la compactación, porosidad, grado de aireación y capacidad de infiltración, lo que condiciona la circulación de agua y aire en el suelo, los procesos de establecimiento de las plantas (emergencia, enraizamiento) y el manejo del suelo.

La densidad aparente afecta al crecimiento de las plantas debido al efecto que tienen la resistencia y la porosidad del suelo sobre las raíces. Con un incremento de la densidad aparente, la resistencia mecánica tiende a aumentar y la porosidad del suelo tiende a disminuir, con estos cambios limitan el crecimiento de las raíces a valores críticos. Los valores críticos de la densidad aparente para el crecimiento de las raíces, varían según la textura que presenta el suelo y de la especie de que se trate. (Paz Gonzales, 09/04/2017)

Los valores bajos de densidad aparente son propios de suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y buena penetración de raíces, lo que permite un buen desarrollo de las raíces. Los valores altos de densidad aparente son propios de suelos compactos y poco porosos, con aireación deficiente e infiltración lenta del agua, lo cual puede provocar anegamiento, anoxia y que las raíces tengan dificultades para elongarse y penetrar hasta alcanzar el agua y los nutrientes necesarios. En estas condiciones, el desarrollo y crecimiento de las plantas es impedido o retardado consistentemente. (Rojas, 2008)

1.1.9. Textura del suelo

1.1.9.1. ¿Por qué es importante conocer la textura de un suelo agrícola?

A modo de introducción, debemos de conocer que se entiende por “textura” del suelo. Se puede definir como la combinación y distribución de diferentes tamaños de las partículas elementales que lo forman. En función del tamaño, porosidad o absorción del agua en la partícula del suelo o sustrato, puede clasificarse en 3 grupos básicos que son la arena, el limo y las arcillas. Además, con ayuda del diagrama textural se puede determinar exactamente el tipo de suelo a tratar.

Es importante decir que la textura del suelo es una propiedad de enorme importancia económica para el trabajo en el campo, ya que influye decisivamente en el comportamiento del suelo respecto a su capacidad de retención de agua y nutrientes, su permeabilidad (encharcamiento, riesgo de lixiviación de agua y nitrógeno, etc.), su capacidad para descomponer la materia orgánica y también en la forma en que se deben manejar aspectos tan importantes como el riego.

Los suelos arenosos, sueltos, tienen pocos poros y grandes, están bien aireados, son permeables y pueden almacenar poca agua y nutrientes. Los suelos arcillosos, fuertes, con muchos más poros, pero más pequeños, son más compactos, menos permeables y pueden retener una mayor cantidad de agua y elementos químicos. Su fertilidad es, por tanto, más elevada.

Por ello, en la agricultura a gran escala, la textura tiene implicaciones directas en multitud de procesos y eso condiciona el buen desarrollo de los cultivos. Es decir, a la hora de trabajar el suelo, la textura será la que defina la dificultad de trabajo. Suelos arcillosos y muy pesados son muy difíciles de trabajar. En un huerto lo notaremos más o menos, pero en las grandes producciones, los costes en horas de trabajo y combustible de maquinaria se disparan si el suelo es demasiado pesado. Teniendo en cuenta todo ello, es muy importante realizar análisis de suelos de nuestros cultivos para prevenir o remediar cualquier problema que pueda derivar de la textura de estos. (C.J, 2019)

1.1.10. Manejo de la compactación del suelo

- Si la compactación que existe en un lote es superficial se puede solucionar relativamente fácil con roturación del suelo en los primeros 5 cm. usando rodillos aireadores o rastras rotativas. Si la compactación es en profundidad se deben realizar roturaciones hasta por lo menos 40 cm. de profundidad usando principalmente escarificadores o subsoladores con los que se va rompiendo la capa endurecida para permitir la infiltración del agua y el paso de las raíces a través de los agrietamientos producidos. Hoy en día las descompactaciones por debajo de la profundidad normal del arado son difíciles de resolver y de alto costo económico. Antes de utilizar el subsolador se debe identificar a qué profundidad está la compactación y pasarlo de 5 a 10 cm. por debajo de la misma, y con el suelo lo suficientemente seco. Si se hace un subsolado cuando el lote tiene la humedad del suelo a capacidad de campo se puede crear más compactación en vez de eliminarla. El subsolador es la herramienta que utilizada convenientemente afloja el suelo y va soltando las capas compactadas, levantándolas y disgregándolas, formándose una red de macroporos interconectados, algunos de los cuales van desde el subsuelo suelto hasta la superficie, actuando como vías para la penetración de raíces y el flujo de agua y aire. Los subsoladores normalmente trabajan a profundidades de 30-70 cm.

El subsolado es una labor de elevado costo y por lo tanto debe hacerse sólo cuando las características del suelo lo justifican. Por lo tanto, antes de tomar la decisión de hacer esta labor debe estudiarse con detención el perfil del suelo, determinando la presencia de estratos de suelo compactados, analizando su ubicación y distribución espacial en el lote.

Numerosos Investigadores y Técnicos opinan que la escarificación no es compatible con la siembra directa (SD): indican que en un sistema de producción sin remoción de suelo y con la adecuada rotación de cultivos no hay compactación excepto en las huellas que puedan generarse por el paso de los carros graneleros y las cosechadoras. A su vez, afirman que para reducir la compactación se debe recurrir a la utilización de recursos biológicos que estén orientados a mejorar la porosidad y estabilidad de los

agregados del suelo. Al generar cubierta vegetal (por cultivos de rotación o praderas permanentes) se incorpora materia orgánica al suelo a través de la parte aérea y de las raíces de las plantas. En este sentido, se debe considerar la inclusión de especies de arraigamiento profundo para que las raíces lleguen y penetren el subsuelo compactado, favoreciendo la estructuración del suelo y la formación de macroporos más estables que aquellos que se pueden generar mecánicamente. Esta práctica tiene un mayor efecto a largo plazo que las medidas anteriores, por lo que se la considera también como un manejo preventivo.

Finalmente, estos técnicos afirman que la labor de escarificado aumenta los costos comparado con una SD continua y no aporta una solución de largo plazo. (Pioneer, 2012)

1.1.10.1. Disminución de la compactación del suelo

La compactación del suelo es un fenómeno difícil de corregir y de un elevado costo. Por lo tanto, hay que tomar las medidas necesarias para que este fenómeno no ocurra o bien se controle, de manera que no llegue a niveles que limiten el potencial productivo de la especie cultivada. También debe tenerse en consideración que, si bien el problema puede ser aliviado con algunas medidas de corrección, existe el riesgo de recompactar el suelo y el lote puede quedar en un nivel de mayor degradación aún. Por lo tanto, luego de aliviada la compactación, es necesario realizar prácticas de manejo de suelos que eviten que este fenómeno se vuelva a producir en forma intensa. La mejor estrategia para minimizar la compactación es evitar trabajar los suelos húmedos, especialmente en las estaciones de mayor precipitación. La eliminación de toda la compactación del suelo, sin embargo, es casi imposible. Estos son algunos consejos para reducir la compactación de los suelos:

- Controlar el tráfico de rodados. Las investigaciones muestran que el 80% de la compactación por rodados se produce en la primera pasada, por lo que se deberían limitar las pasadas a través del lote y usar el mismo patrón de tráfico siempre que sea posible.

- Aumentar la superficie del neumático en contacto con el suelo mediante el uso de neumáticos dobles, neumáticos de mayor diámetro, neumáticos radiales, o disminuyendo su presión de inflado. Esto puede aumentar el potencial de compactación de la superficie, pero reduce la compactación del suelo en profundidad, que es lo más difícil de solucionar.
- En siembras convencionales se deberían alterar las profundidades de la labranza para evitar efectos aditivos y el piso de arado. (Pioneer, 2012)

1.2. Diagnóstico de la compactación del suelo utilizando un penetrómetro

El material de laboratorio para la medición del alcance y la profundidad de la compactación del subsuelo es un penetrómetro, también conocido como probador de compactación del suelo. La compactación del suelo es una preocupación seria para los agricultores ya que puede reducir fácilmente los rendimientos de los cultivos en un 10% y puede conducir a la degradación de la calidad del agua y del suelo debido al aumento de la escorrentía y la destrucción de la estructura del suelo.

La expansión continua de las granjas significa que los rebaños están creciendo, se cosecha más forraje por granja, se produce más estiércol, se usa un equipo más grande para esparcir el estiércol y cosechar y transportar forrajes y granos. Esto significa que se requieren de adaptaciones en el modo de operación para mantener el suelo en condiciones óptimas y la compactación es un problema que va en aumento.

Hay dos formas de compactación: superficial y subsuperficial. Si bien la compactación de la superficie puede aliviarse en parte con las operaciones normales de labranza, la compactación subsuperficial por debajo de la profundidad de labranza normal permanece. Fracturar o cortar el suelo compactado debajo de la superficie, en algunos casos, ha resultado en incrementos notables en el rendimiento. Sin embargo, muchos productores sospechan que tienen un problema de compactación del subsuelo, pero no saben cómo medirlo. (CRISOL, 2020)

1.2.1. ¿Qué es un penetrómetro?

Un equipo de medición diagnóstico para medir el alcance y la profundidad de la compactación del subsuelo es un penetrómetro o probador de compactación del suelo.

Esta herramienta puede ayudar a los productores a determinar si el subsuelo puede ser beneficioso y a qué profundidad se debe establecer el subsolador.

Un penetrómetro consiste en un cono circular de acero inoxidable de 30° con un eje impulsor y un manómetro. El penetrómetro generalmente viene con dos conos, uno con un diámetro de base de 0.798 (3/4) pulgadas para suelos blandos y el otro con un diámetro de base de 0.505 (1/2) pulgadas para suelos duros.

La punta es ligeramente más ancha que el eje impulsor para limitar la fricción del eje con el suelo. El eje motor generalmente se gradúa cada 3 pulgadas para permitir la determinación de la profundidad de compactación. El medidor de presión indica la presión en libras por pulgada cuadrada o en otra escala, según la configuración seleccionada.

El penetrómetro está diseñado para imitar la raíz de una planta. Por supuesto, la raíz de una planta está viva y es mucho más pequeña que un penetrómetro, por lo que se puede esperar que el penetrómetro tenga algunas deficiencias. Es importante considerar que la penetración de la raíz disminuye linealmente con la resistencia a la penetración, hasta que casi ninguna raíz penetra en el suelo con una resistencia de 300 PSI.

Aunque el límite del crecimiento de raíz cero puede no ser exactamente a 300 PSI, es seguro que el crecimiento de la raíz se inhibirá en gran medida con lecturas de penetrómetro más altas tanto en suelos húmedos como secos, y es independiente de la textura del suelo. Desafortunadamente, el penetrómetro no captura poros creados por fuerzas físicas o biológicas tales como congelación, descongelación, humectación, secado, excavación de lombrices de tierra y canalización de raíces. Las raíces de las plantas encontrarán y crecerán a través de estos espacios en el suelo si están presentes. (CRISOL, 2020)

1.2.2. Cómo usar el penetrómetro

Las lecturas tomadas con el penetrómetro se denominan índice de cono. Las lecturas deben tomarse cuando todo el perfil está en la capacidad de campo, aproximadamente 24 horas después de una lluvia profunda. La mejor época del año para el uso de material

de laboratorio para la medición de la compactación es en verano, porque generalmente todo el perfil se ha humedecido completamente.

Si el suelo está demasiado húmedo o fangoso, la compactación podría subestimarse porque el suelo actúa como un líquido. Si el suelo está demasiado seco, la compactación podría sobreestimarse porque las raíces podrán penetrar el suelo cuando se humedezca.

La idea detrás del uso de este equipo para laboratorio es la capacidad de campo es que este es el mejor escenario para las raíces. Con suerte, el suelo estará a capacidad de campo en varios momentos durante la temporada de crecimiento. Durante estos períodos, las raíces podrán penetrar en el suelo que tiene baja resistencia a la penetración. La resistencia a la penetración aumentará cuando el suelo se seque, y se puede esperar que el crecimiento de las raíces sea limitado. Sin embargo, cuando el contenido de humedad del suelo aumenta nuevamente, la resistencia a la penetración disminuirá y se reanudará el crecimiento de las raíces.

La varilla del penetrómetro debe introducirse en el suelo a una velocidad de aproximadamente una pulgada por segundo. A medida que empuja el penetrómetro en el suelo, registren la profundidad a la que se excede el nivel de 300 PSI, utilizando los gradientes en la varilla del penetrómetro. Este nivel es la parte superior de la zona compactada.

Continúen presionando el penetrómetro hacia abajo y registren la profundidad a la que la penetración cae por debajo de 300 psi. Este es el fondo de la zona compactada. Para cada punto de medición hay dos números: la parte superior de la zona de compactación y la parte inferior de la zona de compactación. Si la resistencia a la penetración nunca aumenta por encima de 300 PSI, tendrán espacios en blanco en ambos espacios, lo que indica que no hay compactación severa que limite las raíces. Si la resistencia a la penetración aumenta por encima de 300 PSI, pero nunca cae por debajo de 300 PSI, no hay fondo en la zona de compactación.

El índice del cono debe medirse según el relieve de la labranza, las huellas de las ruedas, las hileras de plantas y otros patrones reconocibles en el campo. Por ejemplo,

si conocen las áreas de tráfico de las ruedas, tome transectos dentro y fuera de la pista, y repórtenlos por separado. Si hay zonas subsoladas en el campo, midan la resistencia a la penetración dentro y fuera de la zona subsolada. Si hay filas plantadas, tomen medidas dentro y entre las filas, y repórtenlas por separado.

El número de lecturas en un campo depende de la precisión que deseen. Como primera aproximación, tomen algunas lecturas preliminares en algunos lugares del campo para desarrollar una estrategia de muestreo.

Es probable que los valores del índice de cono sean bastante variables, por lo que se requieren múltiples lecturas por campo. Si reconoce patrones, es posible que deseen aumentar el número de lecturas e informarlas por separado como se sugirió anteriormente. Es extremadamente útil comparar los valores del índice de cono en el campo con mediciones en áreas no perturbadas, como filas de cercas. (CRISOL, 2020)

1.3. Caña de azúcar

El 65% de las raíces se encuentran en los primeros 20 cm de profundidad del suelo y el 80% de ellas se concentran en un radio de 60 cm de la cepa y 60 cm de profundidad. (Gonzalez Villalba & Duarte Álvarez, 2019)

1.3.1. Suelo

Las propiedades favorables del suelo para el cultivo de la caña de azúcar son:

- **Textura:** suelo con proporciones adecuadas de los tres componentes, es decir un suelo franco-areno-arcilloso.
- **Estructura:** granular que facilite su laboreo y capacidad para almacenar agua y un adecuado grado de infiltración.
- **Composición mineral:** una suficiente cantidad de los cuatro nutrientes minerales calcio (Ca), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K); además de materia orgánica, como partículas de humus.
- **Acidez o alcalinidad:** la caña de azúcar tolera valores de pH entre los 5.5 a 8.

Las condiciones ideales de suelo para el cultivo de la caña de azúcar son suelos profundos, alcanzando 80 a 90 cm y buen drenaje natural.

Es muy importante para el cultivo de la caña de azúcar disponer de un sistema radicular bien desarrollado, activo y profundo. Entonces, es necesario que los suelos a ser destinados para su cultivo sean profundos, fértiles, bien aireados; que tengan una elevada capacidad de retención de agua y una buena estructura.

Los terrenos no siempre pueden ser utilizados tal como se encuentran. Es decir, frecuentemente hay que ponerlos en condiciones para entrar en producción. Se debe eliminar todos los obstáculos (cocoteros, árboles, tocones, etc.) que se presentan para el empleo de máquinas, permitir una preparación normal del suelo y facilitar posteriormente las operaciones de transporte. (Gonzalez Villalba & Duarte Álvarez, 2019)

1.3.2. Preparación del suelo

La caña de azúcar es una planta perenne y su vida económica se prolonga durante varios ciclos ya que permite cinco cortes (socas) o más, beneficio que se obtiene con una buena preparación del terreno. La secuencia de las labores para la preparación y adecuación de tierras se describe a continuación.

- **Levantamiento topográfico:** el plano topográfico debe incluir las vías internas de la finca, la localización de los cercos existentes y la posición de la fuente de abastecimiento de agua.
- **Limpieza o descepada:** consiste en eliminar los desechos de los cultivos diferentes a la caña o en la destrucción de las cepas viejas, en caso de renovación.
- **Nivelación:** se debe efectuar en época seca, siguiendo la conformación natural del terreno y con un desnivel de 2 por mil, el cual permite un control eficaz del agua superficial, tanto para fines de desagüe como de riego. Se emplean traíllas, tractores, motos niveladoras y landplane.

- **Subsolada:** su objetivo principal es romper y fragmentar las capas de tierra impermeables que se van formando en las tierras cultivadas, especialmente con este cultivo por el tamaño y peso de la maquinaria de cosecha, para mejorar el drenaje interno y la aireación del suelo. Se recomienda hacerla a una profundidad de 50-60 cm y una separación entre cortes de 1,50 m.
- **Arada:** esta labor persigue romper y voltear la capa arable del terreno, a una profundidad de 25 cm en suelos poco profundos y de 35-40 cm en suelos profundos, se debe efectuar en época seca, con arados de disco o vertedera o también con rastras pesadas tipo Rome.
- **Rastrea:** se utiliza para cortar, desterronar y voltear el suelo, hasta mullirlo, así como para destruir e incorporar los residuos de cosecha. Se aconseja una o dos pasadas de rastra, utilizando rastras de varios discos deben impedirse el afinamiento excesivo del suelo, especialmente en zonas muy ventosas.
- **Surcada:** los surcos, si las condiciones y la topografía del terreno lo permiten, deben ser trazados con gradientes de 1 a 2%, en líneas rectas o en contorno. Para esta labor se utiliza un implemento, especial de zanjeadores o cuerpos. Existen surcadores de uno y dos cuerpos, dependiendo de la potencia del tractor con que se hace la labor. Los surcadores trabajan a una profundidad aproximada de 25-30 cm y la tierra que desplaza hacia los lados forma un camellón que van entre los surcos. La semilla se coloca en el fondo del surco en la mayoría de las siembras y a una distancia de 1,40 a 1,60 m entre surcos, dependiendo de la topografía del terreno la altitud local y la variedad utilizada. Sin embargo, en las regiones muy lluviosas y en suelos pesados, se debe utilizar un surcador especial, que es un implemento con tres cuerpos de zanjeadores, distanciados 1,25 m y entre ambos cuerpos lleva un escardillo en forma de V que hace un pequeño surco sobre el camellón. La semilla se coloca sobre el camellón en el pequeño surco que se ha formado, para protegerlo de la humedad excesiva durante la germinación y desarrollo. (DGIEA, 1990)

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Características generales de la zona

2.1.1. Ubicación de Bermejo

Bermejo se constituye en la capital de la segunda sección de la Provincia Arce del Departamento de Tarija, república de Bolivia.

EL triángulo de Bermejo está localizado al extremo sur del país, limita al este, oeste y sur con la República de Argentina y al norte con la primera sección de la Provincia Arce.

2.1.1.1. Ubicación del área cañera y agroindustrial

El ingenio azucarero se encuentra a 3 Km de la ciudad de Bermejo y está ubicado alrededor de 9 zonas cañeras, las que proveen materia prima.

Latitud

22° 42' 6" sur

Longitud

64° 17' 29" oeste

Ubicación:

Mapa 1. Ubicación del módulo agrícola



2.1.1.2. Producción estimada de caña entregada a fábrica en años diferentes

Actualmente el ingenio se conoce con el nombre de “Ingenio Azucarero Moto Méndez”, patrocinado por la “Industria Agrícola de Bermejo S.A.).

A la fecha, tiene una capacidad de molienda, aproximadamente de 6.000 [Tm/día].

Cuadro 1.- de producción estimada de caña entregada a fábrica en años diferentes

AÑOS	Produccion estimada T.M.	Caña entregada a fabrica T.M.	Hectareas a cosechar	Hectarias cosechadas	Hectarias no cosechadas	Rendimiento por ha.
2012	56.510,760	53.676,760	793,120	757,820	35,3	70,82
2013	45.155,970	36.485,290	807,120	668,620	138,5	54,56
2014	42.764,554	28.913,770	782,500	545,000	237,5	53,05
2015	49.033,310	37.948,870	807,330	627,836	179,5	60,42
2016	44.950,798	38.651,750	815,850	704,650	111,23	54,85
2017	38.207,572	35.593,870	804,020	749,020	55	47,52
2018	32.936,020	30.060,760	802,450	778,750	23,7	38,6
2019	34.578,870	15.693,870	780,520	367,028	413,5	42,72
2020	36.660,520	27.083,000	763,500	625,000	138,5	43,3
2021	30.570,000	21.092,830	688,000	585,000	103	37
2022	26.600,000	22.343,690	665,000	519,000	146	43

2.1.1.3. Condiciones agroclimáticas

Temperatura

El mes más frío es junio, con una temperatura máxima media de 22°C y una temperatura mínima media de 10°C

El mes más cálido es enero, con una temperatura máxima media de 33°C

Altitud

Bermejo se encuentra a una altura de 414 m.s.n.m.

Precipitación

Los meses de lluvias se concentran entre marzo y mayo, por lo que existe un alto grado de humedad. El período de lluvias empieza en octubre y se extiende hasta abril, con una precipitación anual de 1.323,1 mm.

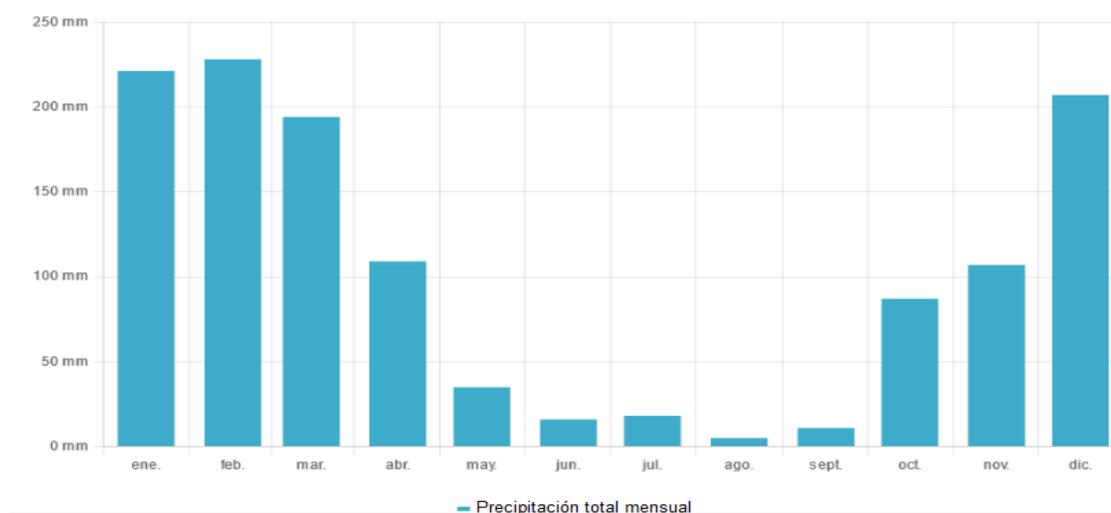
El mes más seco del año es agosto, con una media de 5 mm de precipitaciones.

El mes más lluvioso es febrero, con una media de 228 mm de precipitaciones.

Gráfica 1.- precipitación a lo largo del año

Bermejo

Precipitaciones a lo largo del año



Geosty-tiempo y clima-2021

Vegetación de la zona:

En agricultura continúa el predominio la caña de azúcar, le sigue el maíz y luego la papa, trigo y citrus (naranja, mandarina, limón, pomelo) y frutas tropicales (papaya, banana, mango)

Nombre común	Nombre científico	Familia
maíz	<i>Zea mays</i> L.	Poaceae (Gramineae)
Caña	<i>Saccharum officinarum</i> L.	Poaceae (Gramineae)
Papa	<i>Solanum tuberosum</i> L.	Solanaceae

Trigo	Triticum aestivum L.	Poaceae (Gramineae)
Naranja dulce	Citrus sinensis L.	Rutaceae
Mandarina	Citrus reticulata L.	Rutaceae
limon	Citrus sp.	Rutaceae
pomelo	Citrus paradisi Macf.	Rutaceae
papaya	Carica papaya L.	Caricaceae
banana	Musa sp.	Musaceae
Mango	Mangifera indica L.	Anacardiaceae
Yuca	Manihot esculenta Crantz	Euphorbiaceae

Los productos forestales según su orden de importancia son: lapacho, cedro, palo blanco, roble y tipa.

Nombre común	Nombre científico	Familia
Lapacho	Tabebuia impetiginosa	Bignoniaceae
cedro	Cedrela odorata L.	Meliaceae
Palo blanco	Calycophyllum multiflorum	Rubiaceae
Roble	Quercus robur. L.	Fagaceae
Tipa	Tipuana tipu	Fabaceae

2.2 MATERIALES

2.2.1 Material de campo:

- Penetrómetro CS-900
- GPS Etrex-20
- Mapa de la zona
- Planillas
- Cámara fotográfica
- Machete

2.2.2. Material de gabinete:

- Computador

Programas:

- GS+deostatics for the environmental Sciencies – (Map Image) RP (PSI)

Fieldscout

- Excel, Word

2.2.3. Material vegetal

Caña de azúcar

2.3 METODOLOGÍA

Se utiliza una metodología descriptiva, con el fin de determinar y clasificar los suelos del módulo agrícola del ingenio azucare de Bermejo.

Para empezar con el trabajo se realizó una división por etapas, cuyo fin fue para explicar el desarrollo.

2.3.1. Reconocimiento de la zona en estudio

La superficie total del módulo es de 1100 hectáreas, contempla los cítricos, porqueriza, bosques y caminos secundarios.

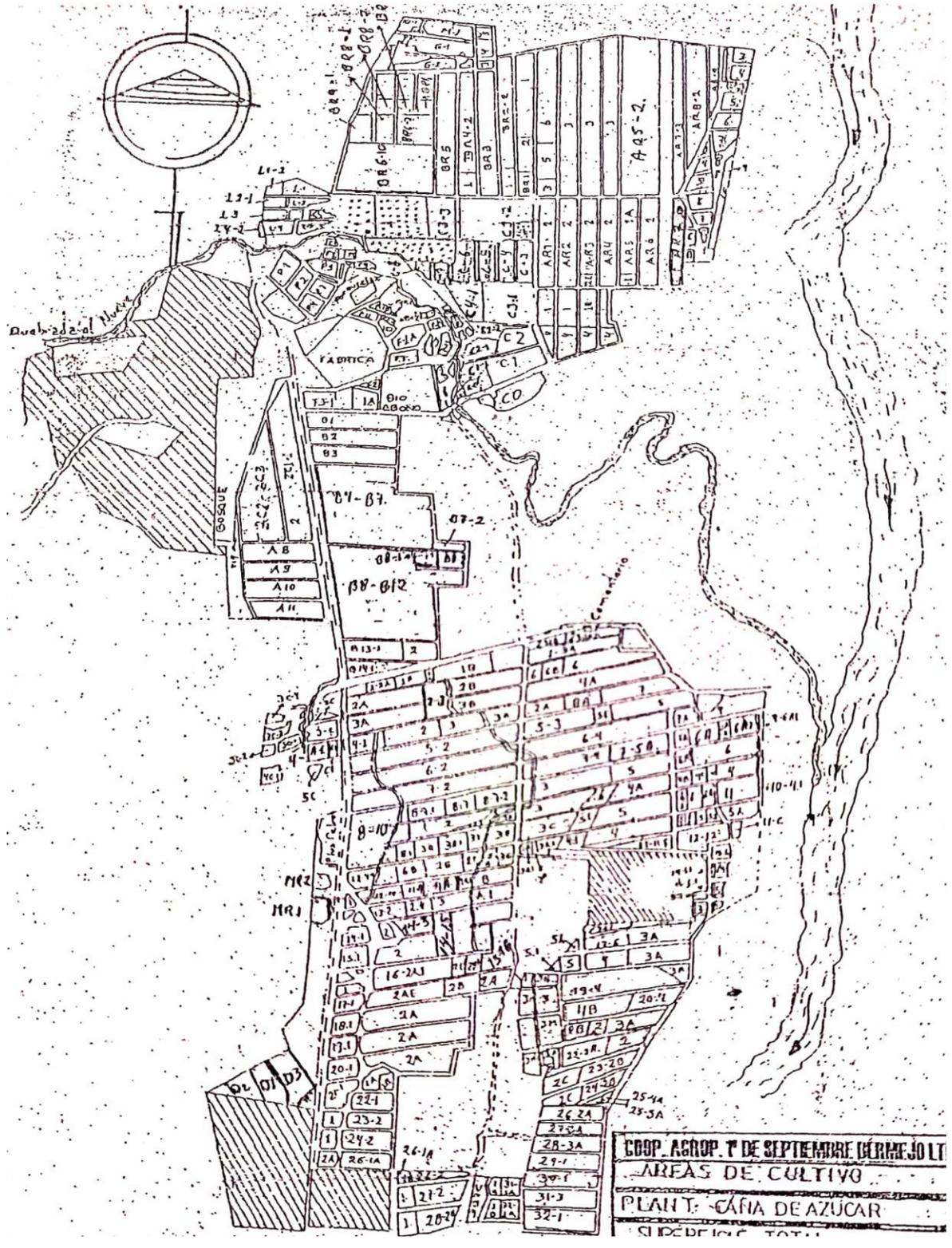
La superficie total en la producción de caña es 763.316 hectáreas, dividida de la siguiente manera:

Sub zona norte es de 235.041 has.

Sub zona central es de 132.611 has.

Sub zona sud es de 395.664 has.

Mapa 2.- extensión general de la zona



2.3.2. Levantamiento de datos en campo

Se realizó a través de la utilización del penetrómetro “SC-900 Fieldscout” (Medidor digital de Compactación del Suelo SC-900) de Spectrum Technologies, Inc. Con las siguientes características:

Cuadro N° 2.- Especificaciones técnicas del penetrómetro cs-900

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PENETRÓMETRO CS-900	
Unidades de medida:	Cone Index (PSI o kPa)
Resolución:	2,5 cm, 5 PSI (35 kPa)
Exactitud:	±1,25 cm, ±15 PSI (±103 kPa)
Rango:	0 - 45 cm, 0 - 1000PSI (0 - 7000 kPa)
Velocidad máxima de penetración:	82 cm/min
Máxima capacidad de carga:	95 kg
Tipo de Pila:	2 baterías alcalinas tipo AA
Duración de la Pila:	Unos 12 meses de vida
Capacidad de registro de datos:	772 medidas sin GPS, 579 medidas con GPS/DGPS
Display:	16 caracteres, LCD de 2 líneas
Peso:	1,25 kg

(Infoagronomo)

Utilizando este equipo provisto por el laboratorio de suelos dependiente de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales de la U.A.J.M.S. Se realizó el siguiente procedimiento.

Para la toma de muestras, el suelo debe estar en capacidad de campo, o lo suficientemente húmedo, suelos secos o con excesiva humedad dan datos erróneos, por lo cual se debe esperar 48 horas como lo indica la teoría después de una intensa lluvia.

Para tomar una medición de perfil se siguió los siguientes pasos:

1. Presione y suelte el botón START.
2. Espere hasta que el LCD muestre la pantalla de información del perfil. La línea superior muestra el índice de cono actual y la profundidad. En la superficie la

profundidad será cero. La segunda línea indica cuantos perfiles se han realizado. Esto vuelve a 1 cada vez que el medidor se pone en marcha.

3. Mantener los pies a una distancia de al menos 10 a 15 cm de la punta de la sonda. Esto asegura que el sensor sónico de profundidad tomará mediciones precisas. Objetos altos y cercanos o las paredes pueden inhibir la habilidad del sensor de “ver” la superficie del suelo. Es aconsejable suavizar la superficie del suelo tanto como sea posible antes de insertar la sonda. Al insertar la sonda en el suelo, la medición de profundidad en la pantalla aumentará en incrementos de 2,50 cm. El índice de cono cambiará en respuesta a las diferencias en compactación del suelo.

Cuadro N°.- 3.- Cuantificación porcentual de lecturas

IC (%) sobre 300 PSI	Grado de compactación	Recomendación para realizar subsolado
<30	Poco - ninguno	no
30-50	Leve	no
50-75	Moderada	si
>75	Grave	si

Gray, Higgins y Wells (1995).

Las mediciones se realizaron en las tres zonas que comprenden el modulo.

Sub zona sud: 67 parcelas

Sub zona central: 17 parcelas

Sub zona norte: 30 parcelas

Dando un total de 114 parcelas muestreadas.

Debido a la superficie que es bastante grande de la zona de estudio (763.316 ha), al difícil acceso de la zona y a los requerimientos del equipo (ya antes mencionados) para hacer las mediciones, se procedió a sacar un solo dato de resistencia por cada parcela;

Para realizar la toma de muestras sobre las áreas indicadas, se coloca una lámina de acero sobre la superficie del suelo que posee un orificio en el centro mediante la cual un sensor detecta la altura y se coloca el penetrómetro sobre la superficie del suelo y se inicia la penetración a una velocidad maso menos constante de 1pul/s (para evitar error por exceso de velocidad), otro factor a considerar es que el área sobre la que se trabajara debe estar limpia de hierbas que interfieran con la lectura del sensor de distancias, ya que ante la interferencia de algún objeto entre el sensor y el suelo el equipo marcará error.

Se introdujo el sensor hasta la profundidad máxima de 30 cm. Existiendo puntos donde debido a la dureza no se alcanzó los 15 cm. Se tomaron 114 puntos con el penetrómetro.

Cuadro N° 4.- GPS ETREX-30

GPS ETREX-30
Mapa base mundial
Pantalla de 2,2" de 65.000 colores, que puede leerse con la luz del sol
Autonomía de la batería de 25 horas con 2 pilas AA
Trabajamos en UTM, obteniendo coordenadas en X (Este) y coordenadas en Y (Norte)

2.3.3 Etapa de gabinete

Para descargar los datos del equipo se siguió los siguientes pasos:

Se accedese al puerto de datos en la parte inferior del medidor SC900 (mostrado arriba) quitando el tornillo de plástico. Es a través de este puerto que el medidor se conecta a un PC

Conexión con un PC:

Del internet se descargó la aplicación FIELDQCOUT, con el cual se puede descargar los datos obtenidos en campo.

El software SC-900 viene con un cable gris para conectar al puerto serie de su ordenador y a la toma del medidor.

Para descargar los datos del datalogger interno se apagó el medidor y conecto el cable gris al puerto RS-232 en la parte inferior del medidor. Una vez que se ha guardado el archivo, el software nos dará la opción de visualizar el archivo inmediatamente.

Los datos se guardan como archivo de texto delimitado por comas y puede visualizarse en una hoja de Excel.

En la hoja de Excel, se separó los datos por zonas, número de muestra y número de parcela con sus respectivas coordenadas. Se sacó el promedio de cada zona, la máxima y la mínima medición.

Con estos datos se utilizó el programa GS+VERSIÓN 10.0 de Gamma Design, un software que grafica mapas en 2D Y 3D.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los objetivos trazados y la metodología adoptada se han obtenido los siguientes resultados.

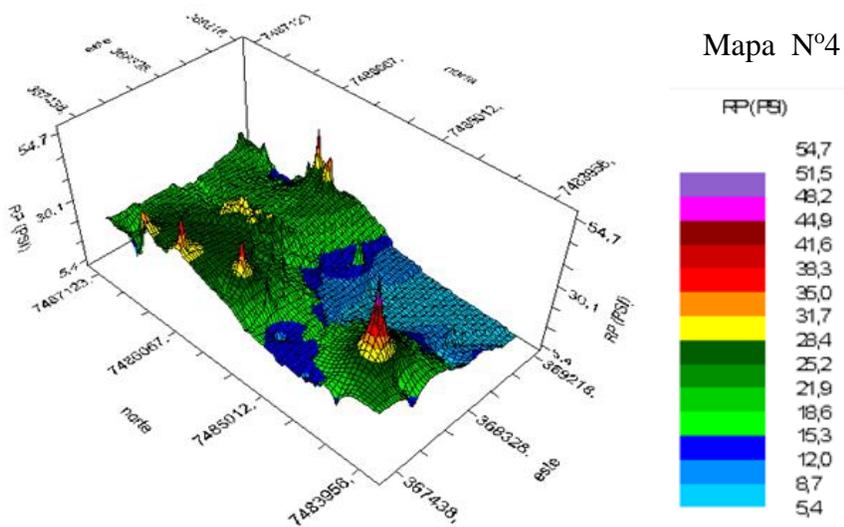
3.1 SUB ZONA SUR

Sub zona: Sur	Nº de parcelas muestreadas: 68	Extensión: 395.664 ha
---------------	--------------------------------	-----------------------

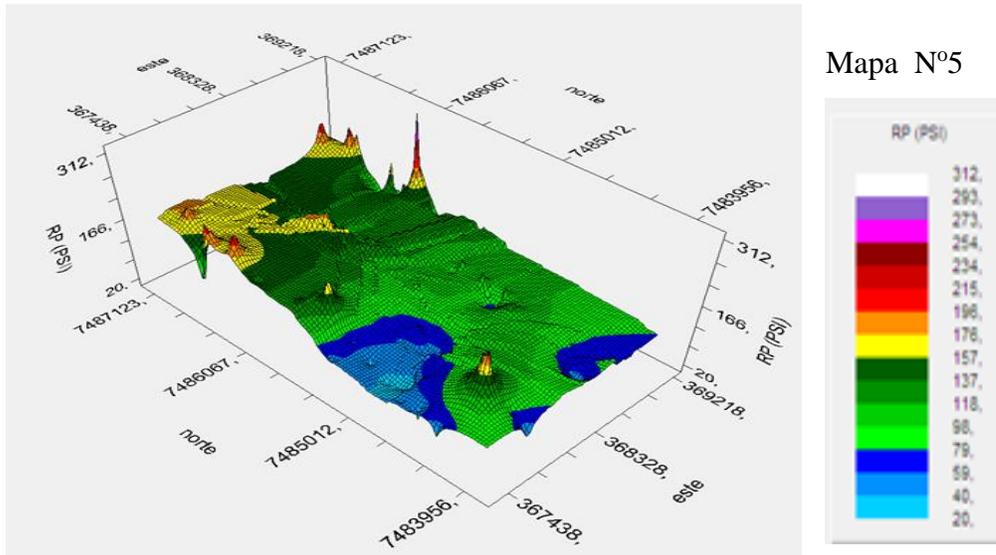
Mapa N°3.- zona sud



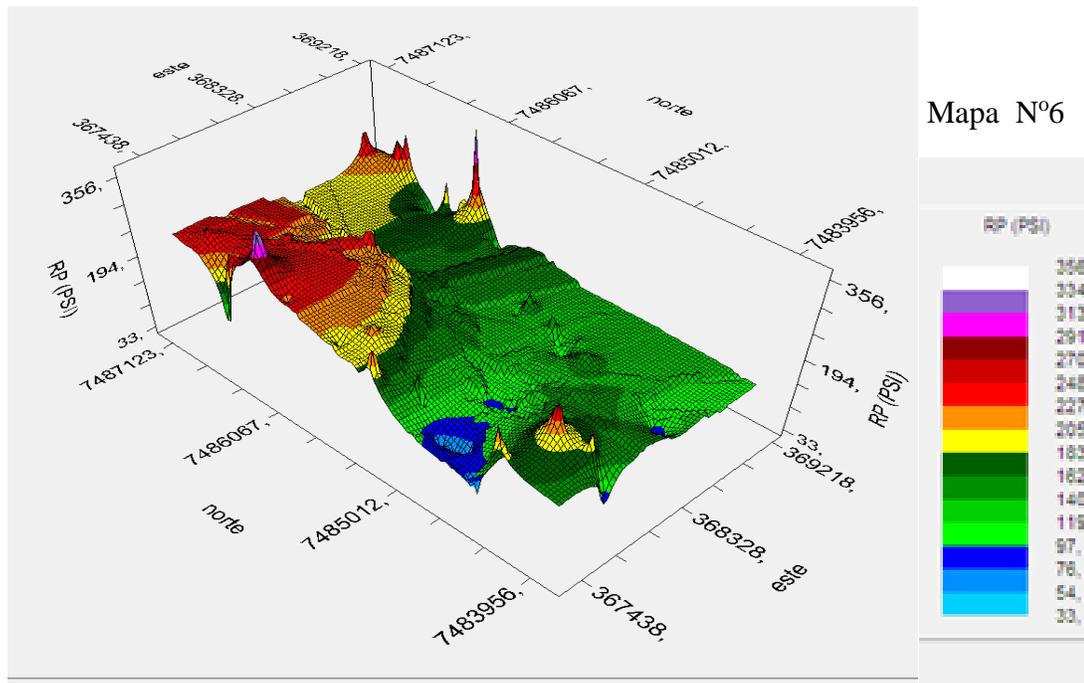
3.1.2. PROFUNDIDAD DE 2.5 CM



3.1.3. PROFUNDIDAD DE 5 CM

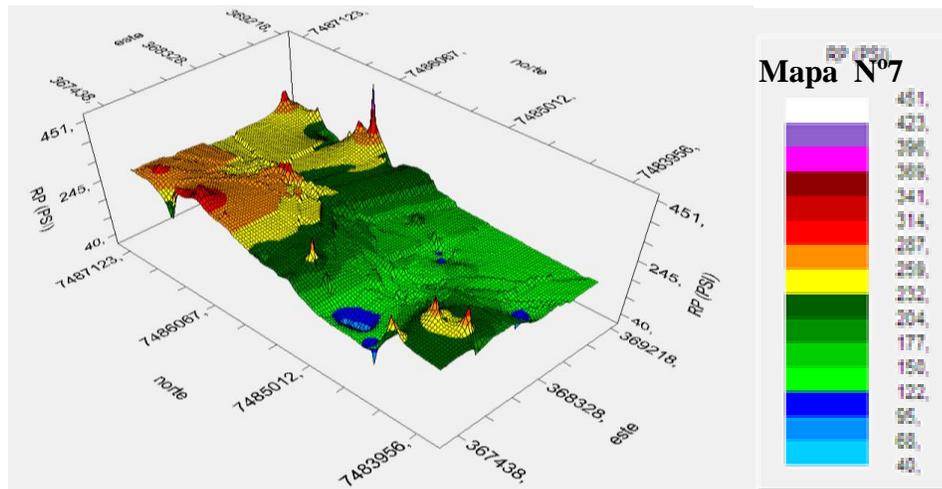


3.1.4. PROFUNDIDAD DE 7.5 CM



- En las profundidades que van desde 0 los 7.5 cm no se halló ningún problema de compactación
- Los valores de presión ejercida no superan los 300 PSI

3.1.5. PROFUNDIDAD DE 10 CM



Rango: 40 – 451 PSI

Azul, Verde, Amarillo, Naranja: 112 -287 (ninguno)

Rojo: 287 – 314 (poco)

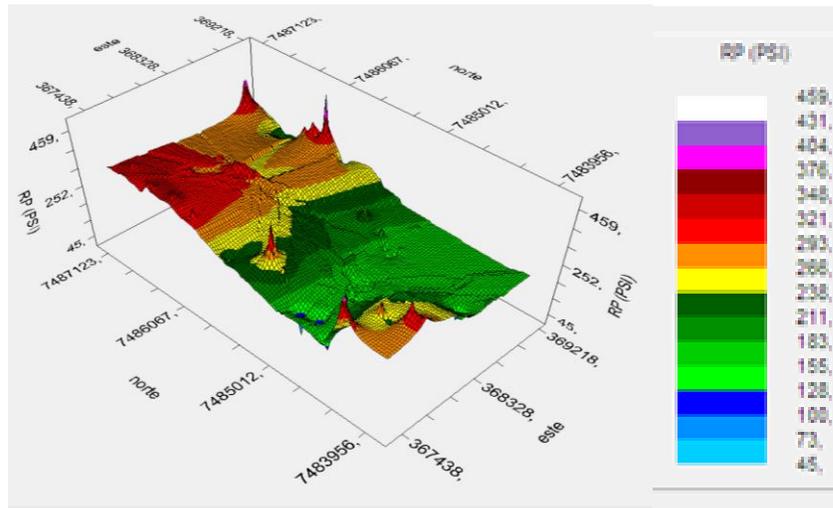
Granate: 314-341 (leve)

Lacre: 341- 369 (moderado)

- Compactación poco a ninguna en las parcelas: 7-14 A-1 A
- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: 2-15 A
- Existen problemas moderados de compactación en las parcelas: A 11-A 8-22-13 A-13 A 2-10 -26 A-2 A- 25 A.

3.1.6. PROFUNDIDAD 12.5 CM

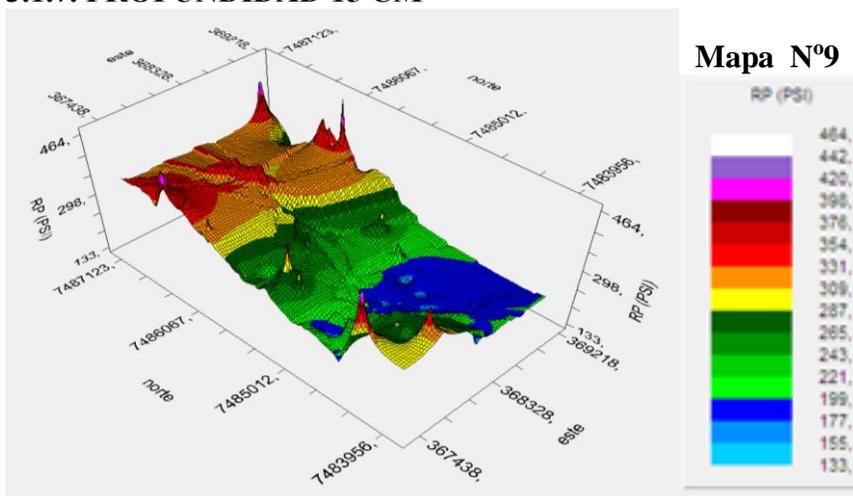
Mapa N°8



Rango: 45 -459 PSI
 Azul-Verde:45 – 238 (ninguno)
 Amarillo y naranja: 238 -321(poco)
 Rojo: 321- 345 (leve)
 Granate: 345-376 (moderado)
 Magenta: +376 (grave)

- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: 28 A-26 -22 (rojo)
- existen problemas de compactación de grado moderado en las parcelas: 7- 27 A-1 A (granate)
- Con una presión ejercida que va desde los 345 – 376 PSI
- existen problemas de compactación de grado grave en las parcelas: 11 A-8 A-26 A-23 A-26 A- 1 A-25 A-16 A2-14 A-10 A(magenta)

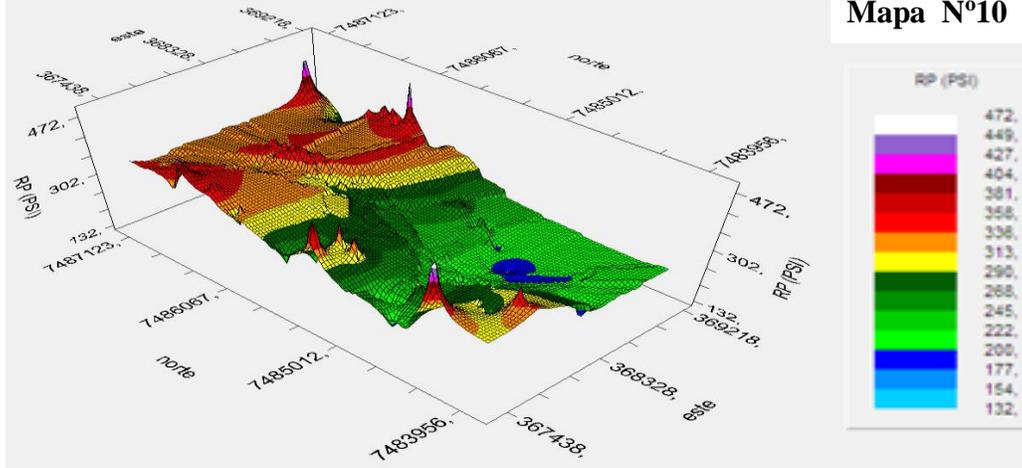
3.1.7. PROFUNDIDAD 15 CM



Rango: 133 -464psi
 Azul y Verde: 133 -287 ninguno
 Amarillo y naranja: 287 -331 poco
 Rojo: 331- 354 leve
 Granate: 354- 376 moderado
 Magenta: + 376 grave

- Existen problemas de compactación de poco a ninguno en las parcelas: 27-10 A- 6- 28 A- 16 A2 (amarillo naranja)
- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: 8-6-27 A-1 A
- Existen problemas de compactación moderado en las parcelas: 3-7-23 A-22
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas: 12 A -11A - 8 A – 7 A - 2 A -26 -26 A1 - 24 A2 -15 A – 13 A – 15 A2 -13 A-11 A-10 A

3.1.8. PROFUNDIDAD DE 17.5 CM



Rango: 132 - 472psi

Azul y Verde: 132 -290 ninguno

Amarillo y naranja: 290 -338 poco

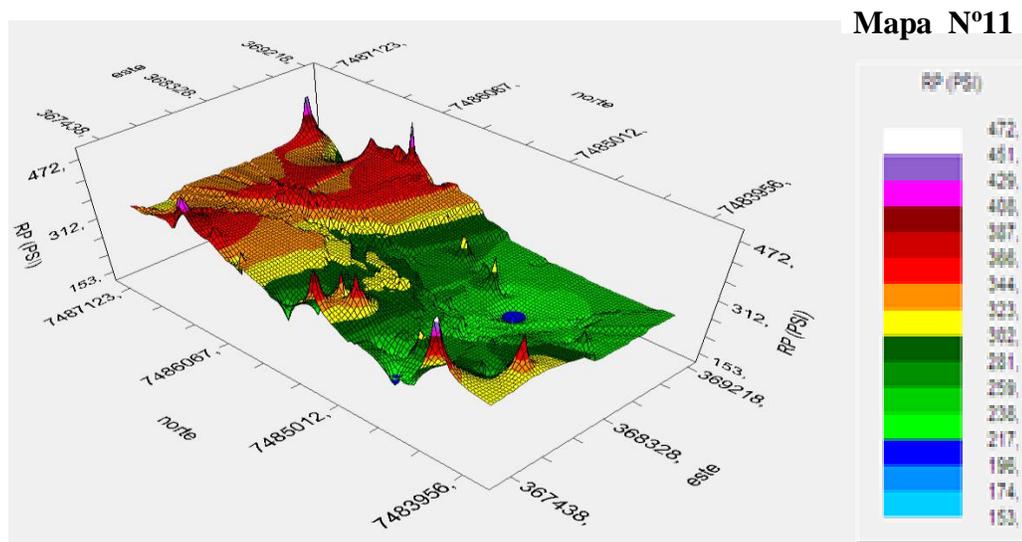
Rojo: 338 -358 leve

Granate: 358 -375 moderado

Magenta +375 grave

- Existen problemas de compactación de poco a ninguno en las parcelas: 3-4-5-7-4 A-28 A-1 A
- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: 11-8-6 A- 20 A -11 A
- Existen problemas de compactación moderado en: 10 A-6-27 A-23A
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas: 12 A -11A - 8 A – 7 A - 2 A -26 -26 A1 - 25 A2 -15 A – 13 A – 16 A2- 15 A2 -13 A-10 A

3.1.9. PROFUNDIDAD DE 20 CM



Rango: 153 – 472 (PSI)

Azul y Verde: 132 -290

Amarillo y naranja: 290 -338

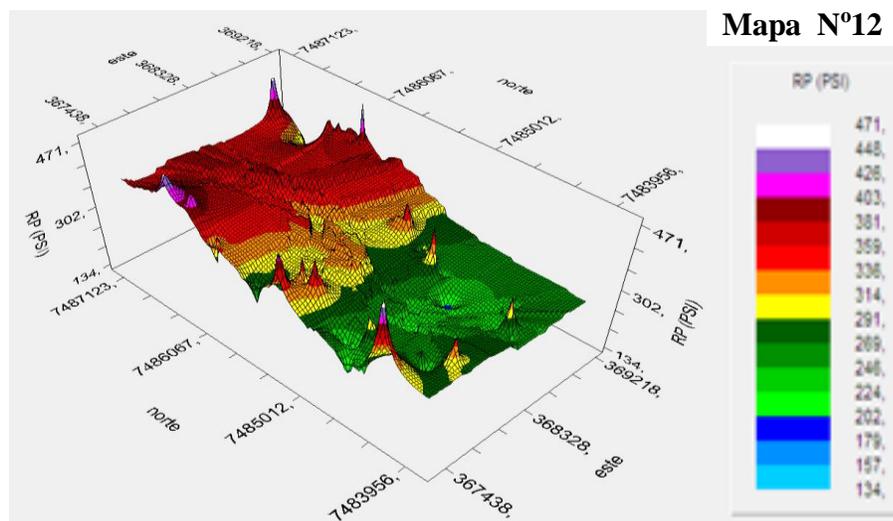
Rojo: 338 -358

Granate: 358 -375

Magenta: +375

- Existe problemas de compactación de poco a ninguno en las parcelas:
30-27-8-3 A-28 A-27 A-22-16 A-2-3 A
- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: 5-11
- Existen problemas de compactación moderado en las parcelas:
7 A-23 A-20 A
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas:
32-4-12 A -10A - 8 A – 7 A- 6 -6A 26 A-26 A1- 25 A2 -15 A – 13 A – 16 A2- 15 A2

3.1.10. PROFUNDIDAD DE 22.5 CM



Rango: 153 – 472 (PSI)

Azul y Verde: 132 -290 ninguno

Amarillo y naranja: 290 -338 poco

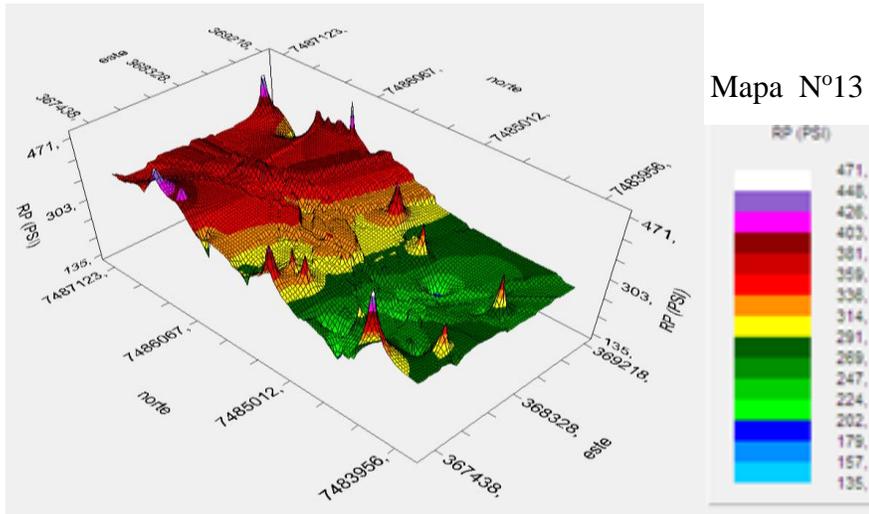
Rojo: 338 -358 leve

Granate: 358 -375 moderado

Magenta: +375 grave

- Existe problemas de compactación de poco a ninguno en las parcelas:
6-3-2-11-16 A-12 A1
- Existen problemas de compactación leve en las parcelas:
27-5-7 A-3 A-23 A-12 A
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas:
32-30-4-12 A -10A -11 A- 8 A – 7 A- 6 -6A 26 A-26 A1- 25 A2 -15 A – 13 A –
16 A2- 15 A2-13 A-2 A3 A

3.1.11. PROFUNDIDAD DE 25 CM



Rango: 135 – 471(PSI)

Azul, Verde-amarillo: 135 -291 ninguno

Amarillo y naranja: 291-338 poco

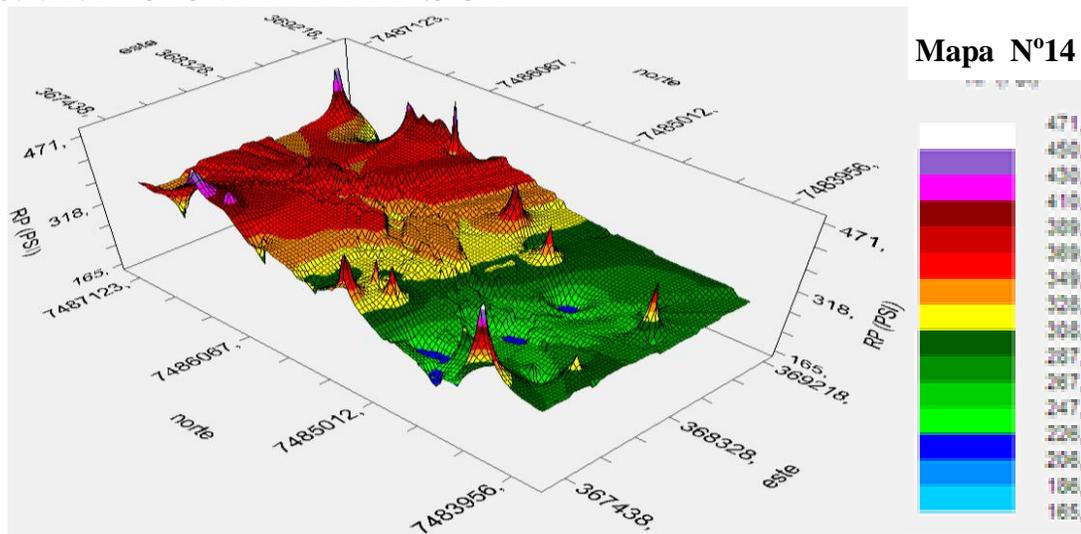
Rojo: 338 -358 leve

Granate: 358 -381 moderado

Magenta: +381 grave

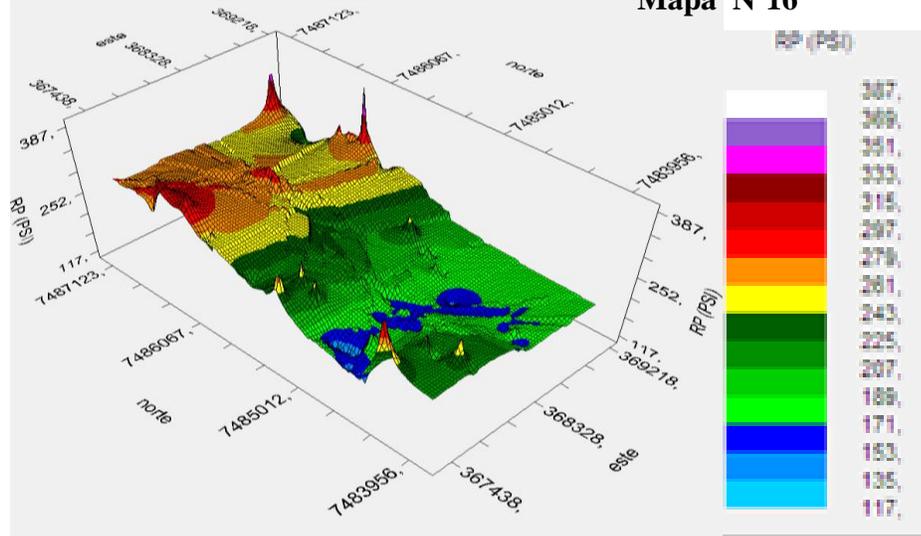
- Existen problemas de compactación de poco a ninguno en las parcelas: 27-7-6-5-2-11-10-8-3 A-12 A1-12 A-1A
- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: 23 A
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas: 32-30-4-3-12 A -11 A-10A -8 A - 7 A- 6 -6 A-2 A- 26 A-26 A1- 25 A2 -15 A - 13 A - 16 A2- 15 A2 3 A-11 A-10 A1-3 A

3.1.12. PROFUNDIDAD DE 27.5 CM



3.1.14. PROMEDIO DE DUREZA

Mapa N°16



Rango: 117– 471 (PSI)

Azul - Verde: 179 -295 ninguno

Amarillo: 295-335 poco

Naranja - Rojo: 335 -354 leve

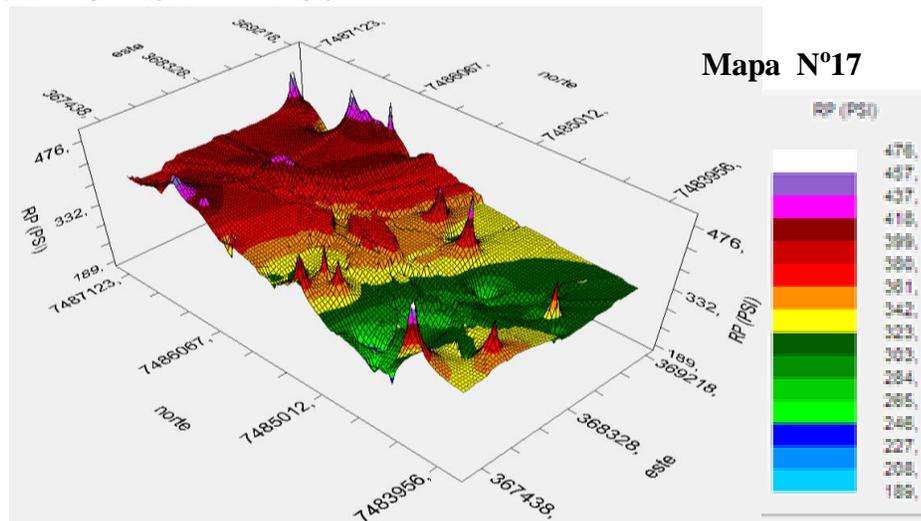
Granate: 354 -374 moderado

Magenta: +374 grave

- Existe problemas de compactación de poco a ninguno en las parcelas: 10 A-26 A-23-26 A1-16 A2-15 A2- 11 A
- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: 8 A-7- 15A
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: 13 A1
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas: 11 A-2 A-25 A2-13 A-10 A

3.1.15. VALORES MÁXIMOS

Mapa N°17



Rango: 189– 476(PSI)

Azul - Verde: 189 – 303 ninguno

Amarillo: 303- 323 poco

Naranja - Rojo: 323 -342 leve

Guindo: 342 -361 moderado

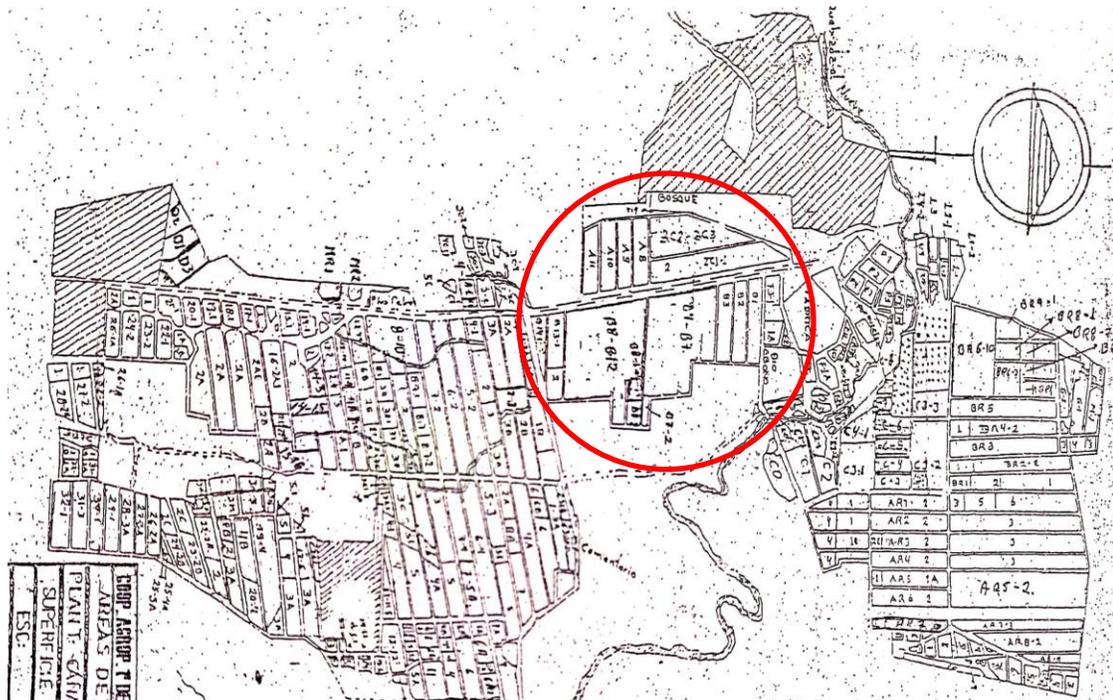
Lilas: 375+ grave

- Existe problemas de compactación de poco a ninguno en las parcelas:
7-8-2-28 A (amarillo)
- Existen problemas de compactación leve en las parcelas:
3 A-12 A1-16 A-12 A-5 (naranja)
- Problemas de compactación moderado en las parcelas:
27-511-8-10-27 A -20 A- 1 A (guindo)
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas:
31-32-30-6-4-3-12 A -11 A-10A –8 A – 7-7 A- 6 -6 A-2 A- 26 A-26 A1- 25 A2
-15 A – 13 A – 16 A2- 15 A2 3 A-11 A-10 A1-3 A- (lila)

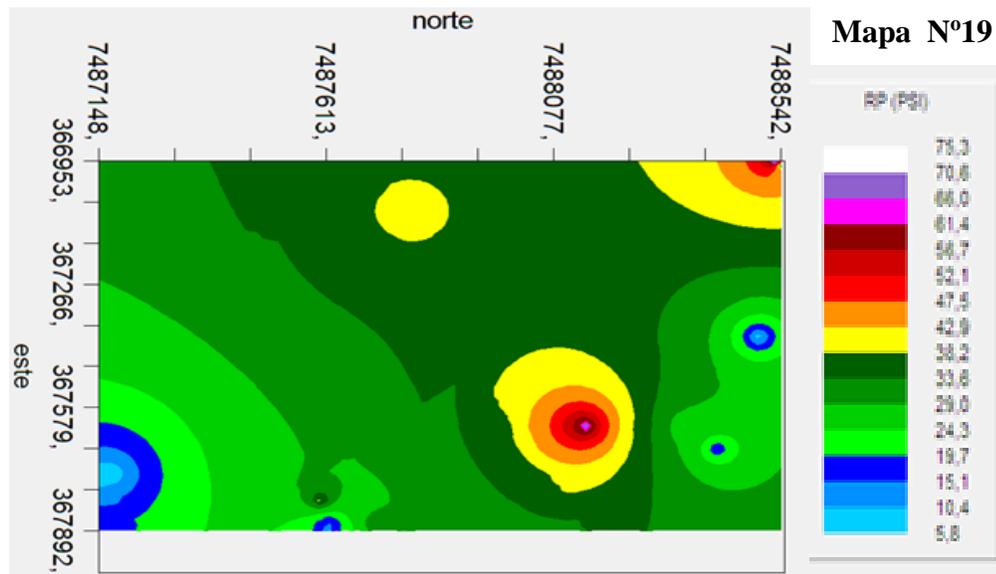
3.2. SUB ZONA CENTRAL

Zona: central	Extensión: 123.611	N parcelas muestreadas: 17
---------------	--------------------	----------------------------

Mapa N°18 zona central

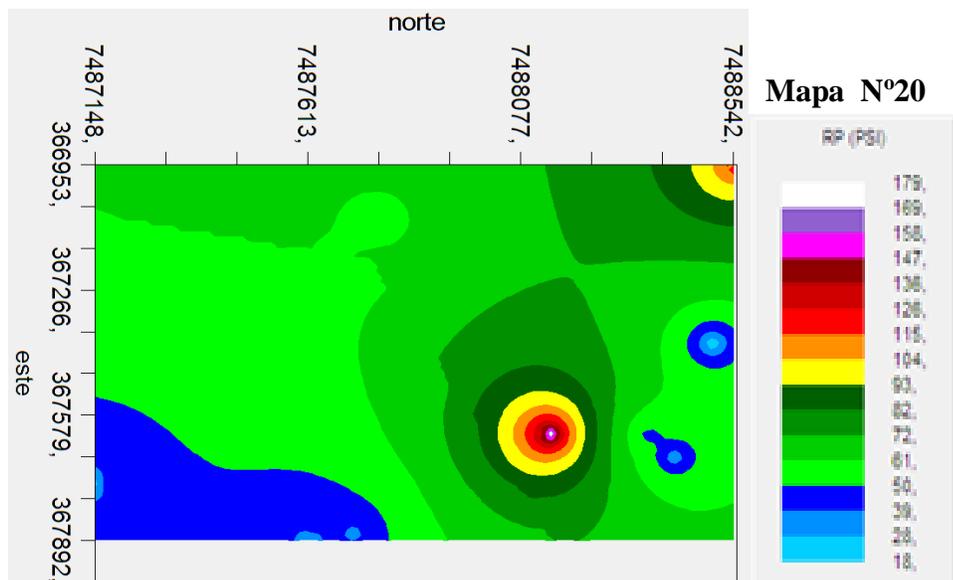


3.2.1. PROFUNDIDAD DE 2.5 CM



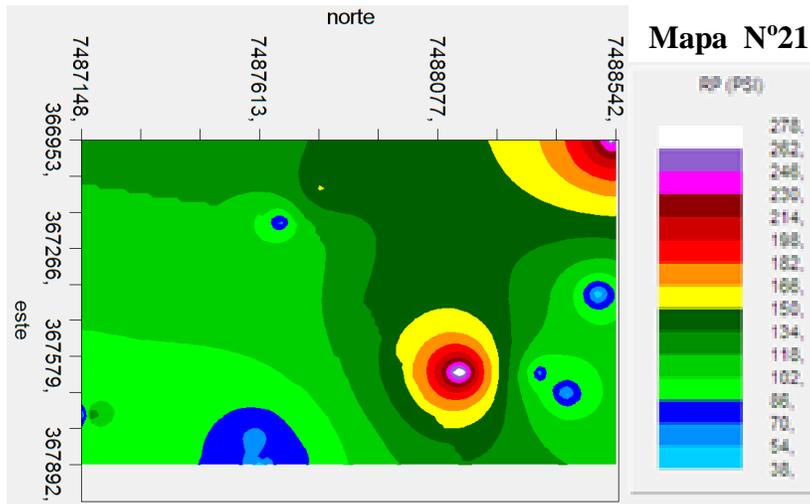
No se observa ningún tipo de problemas de compactación en los primeros 2.5 cm de profundidad, los valores no sobrepasan ni los 80 PSI

3.2.2. PROFUNDIDAD DE 5 CM



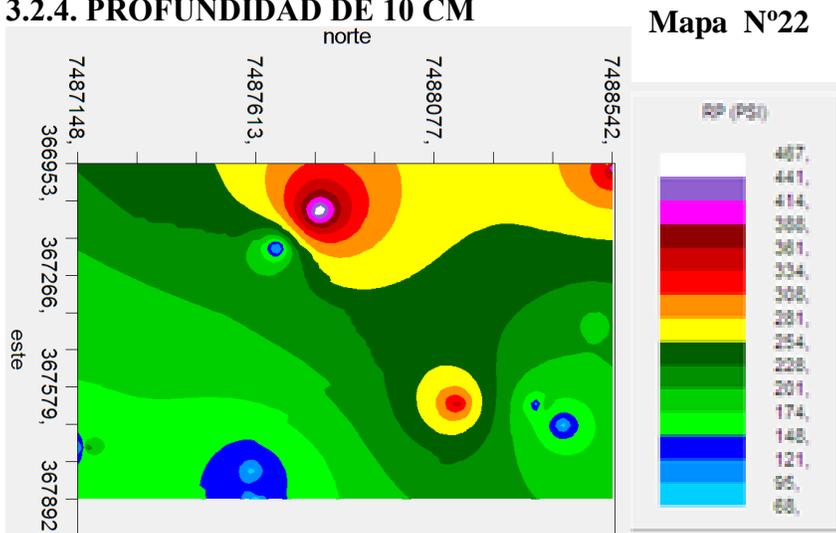
A los 5 cm de profundidad no existe aún problemas de compactación, aunque los valores de presión van en aumento

3.2.3. PROFUNDIDAD DE 7.5 CM.



De la profundidad inicial a los 7,5 cm no se observa problemas de compactación, los valores de presión ejercida no superan los 300 PSI

3.2.4. PROFUNDIDAD DE 10 CM



Rango: 68- 400 (PSI)

Azul – Verde- Amarillo: 68 – 281 ninguno

Naranja -: 281-308-334 poco

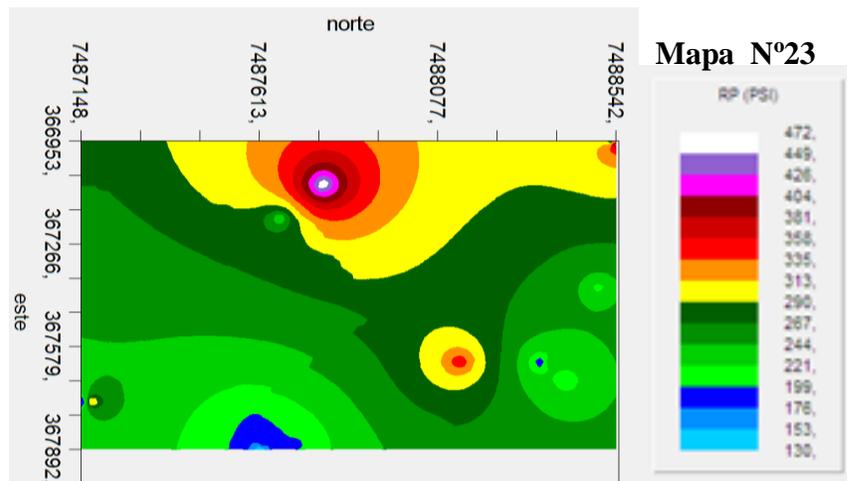
Rojo: 334-361 leve

Granate: 361-388 moderado

Magenta 388 +

- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: B7-4
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: B3
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas: Z1; Z1-2; Z1-3

3.2.5. PROFUNDIDAD DE 12.5 CM



Rango: 68-472(PSI)

Azul – Verde-: 68 – 290 ninguno

Amarillo Naranja -: 290-335 poco

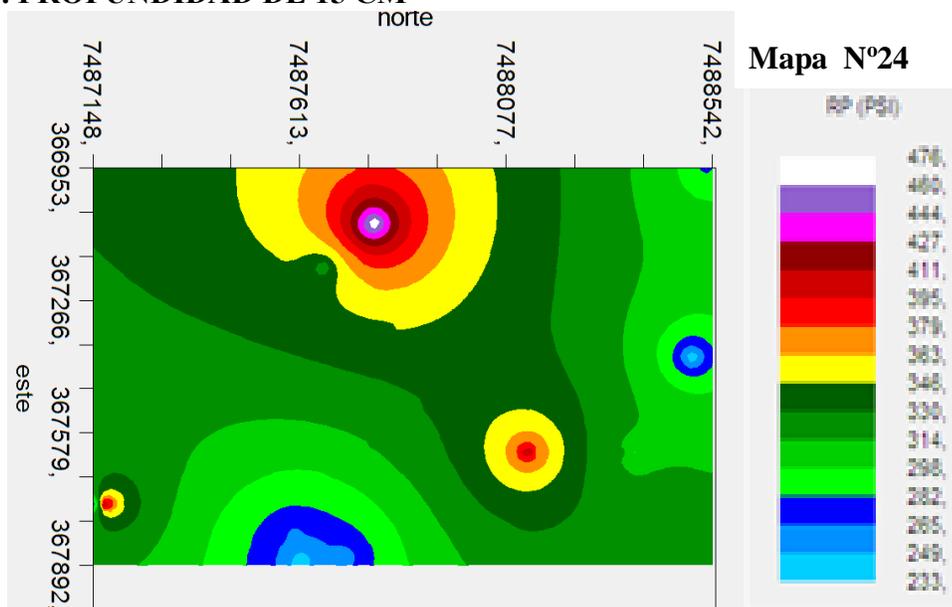
Rojo: 335-358 leve

Granate: 358-381 moderado

Magenta: 381+ grave

- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: B7-4
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: B3; B13-11-12-10-9
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas: Z1; Z1-2; Z1-3

3.2.6. PROFUNDIDAD DE 15 CM

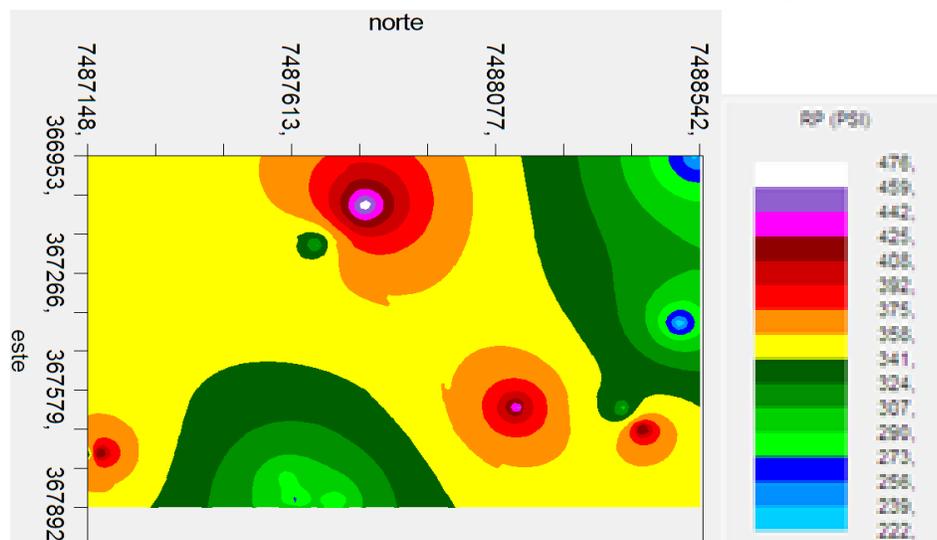


Rango: 233-476 (PSI)
 Azul: 298-282 ninguno
 Verde: 282-330 poco
 Rojo: 335-348 leve
 Amarillo, rojo, granate: 348-363 moderado
 Magenta: 379+ grave

- Existen problemas de compactación poco a ninguno en las parcelas: B-2; 1; A8; A11
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: B3
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas: B13-11-12-10-9; B7-4; Z1; Z1-2;

3.2.7. PROFUNDIDAD DE 17.5 CM

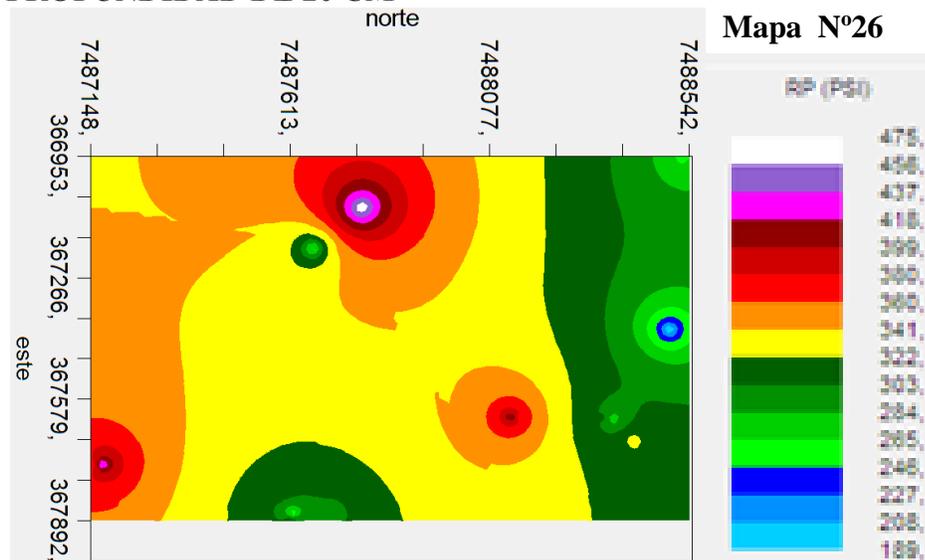
Mapa N°25



Rango: 222-476 (PSI)
 Azul: 222-282 ninguno
 Verde: 282-330 poco
 Rojo: 335-348 leve
 Amarillo, rojo, granate: 348-363- 379 moderado
 Magenta: 379+ grave

- Existen problemas de compactación poco a ninguno en las parcelas: B14; B8-2 (verde)
- Existen problemas de compactación LEVE en las parcelas: B2 (amarillo)
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: B7 (naranja)
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas: B13-11-12-10-9; B7-4; Z1; Z1-2; 1 (rojo, guindo ,lila)

3.2.8. PROFUNDIDAD DE 20 CM



Rango: 189-475 (PSI)

Azul Verde: 189 – 303 ninguno

Amarillo: 303-341 poco

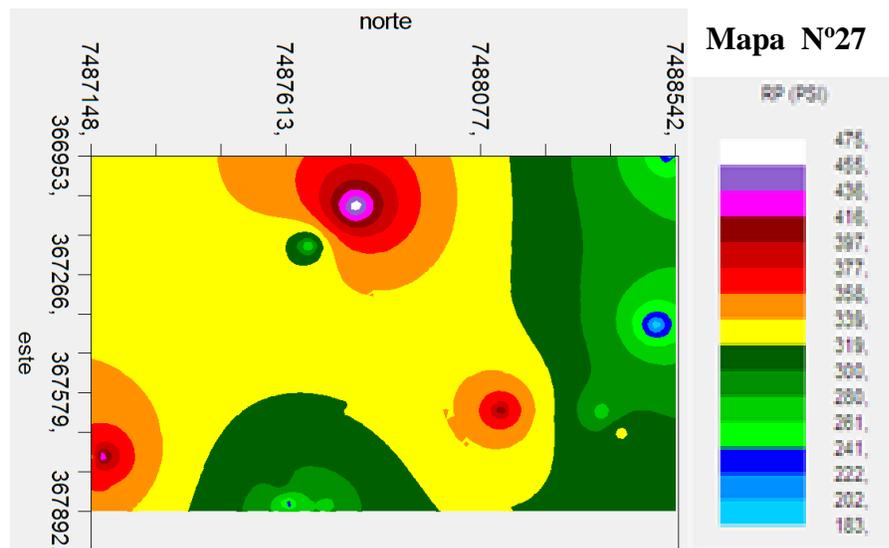
Naranja: 341-360 leve

Rojo, granate: 360-380 moderado

Magenta: 380+ grave

- Existen problemas de compactación poco a ninguno en las parcelas: B9-1; B2
- Existen problemas de compactación LEVE en las parcelas: B14; B8-2; 1
- Problemas de compactación moderado en las parcelas:

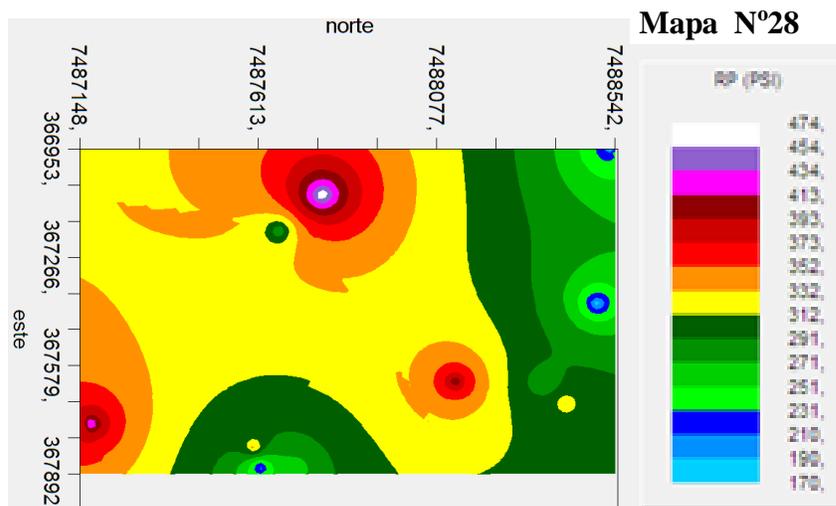
3.2.9. PROFUNDIDAD DE 22.5 CM



Rango: 183-475 (PSI)
 Azul Verde: 183-300 (ninguno)
 Amarillo: 300-339 (poco)
 Rojo-Naranja: 339-358 (leve)
 Rojo, Granate: 358-377 (moderado)
 Magenta: 377+ (grave)

- Existen problemas de compactación poco a ninguno en las parcelas: B9-1; B2
- Existen problemas de compactación LEVE en las parcelas: B14; 1
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: B3
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas: B13-11-12-10-9; B7-4; Z1-2; Z1-3

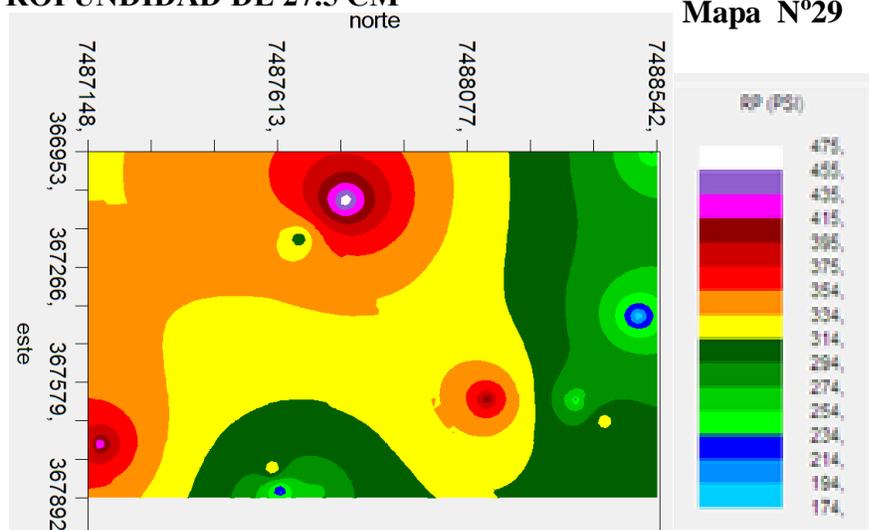
3.2.10. PROFUNDIDAD DE 25 CM



Rango: 170-474 (PSI)
 Azul Verde: 170-291
 Amarillo: 291-332
 Rojo Naranja: 312- 352
 Rojo-Guindo: 352-373
 Lilas: 373+

- Existen problemas de compactación poco a ninguno en las parcelas: B1
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: B3; B9-1; B14
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas: B13-11-12-10-9; B7-4; Z1-2; Z1-3

3.2.11. PROFUNDIDAD DE 27.5 CM



Rango: 174-475 (PSI)

Azul Verde: 174-294 ninguno

Amarillo: 294-334 poco

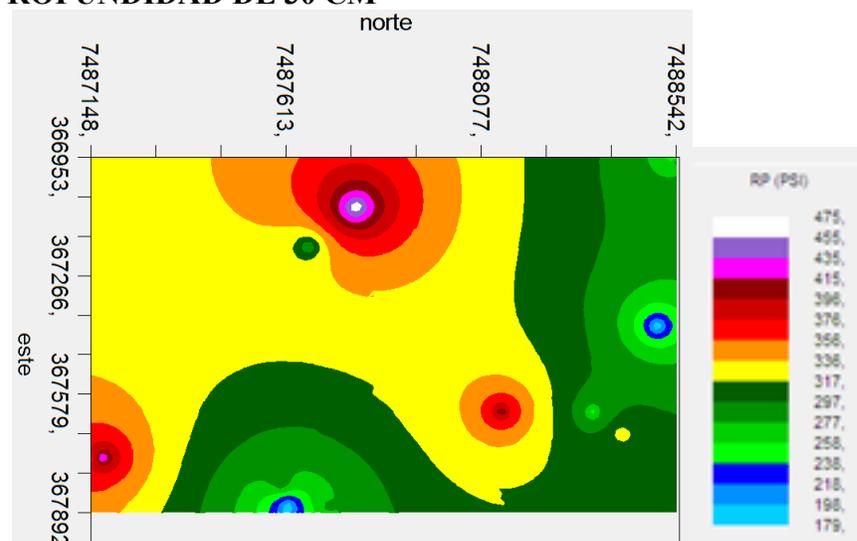
Rojo Naranja: 314- 354 leve

Rojo-Granate:354-375 moderado

Magenta: 375+ grave

- Existen problemas de compactación poco a ninguno en las parcelas: B1
- Existen problemas de compactación LEVE en las parcelas: 1
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: B3;B9-1; B14
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas:B13-11-12-10-9; B7-4; Z1-2; Z1-3

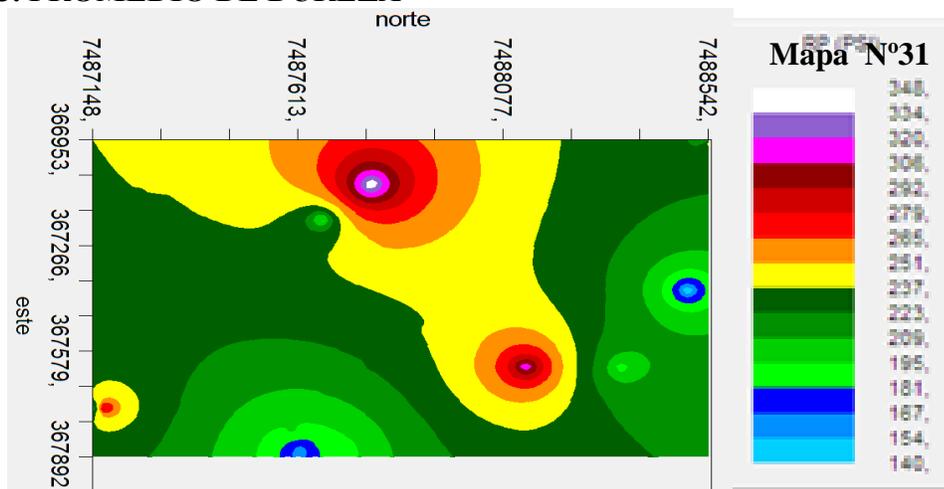
3.2.12. PROFUNDIDAD DE 30 CM



Rango: 179-475 (PSI)
 Azul Verde: 179-297 ninguno
 Amarillo: 297-338 poco
 Rojo, Naranja: 338- 356 leve
 Rojo, granate: 356-376 moderado
 Magenta: 376+ grave

- Existen problemas de compactación poco a ninguno en las parcelas: B1; B9-1
- Existen problemas de compactación LEVE en las parcelas: 1
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: B3;B9-1; B14
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas: B13-11-12-10-9; B7-4; Z1-2; Z1-3

3.2.13. PROMEDIO DE DUREZA

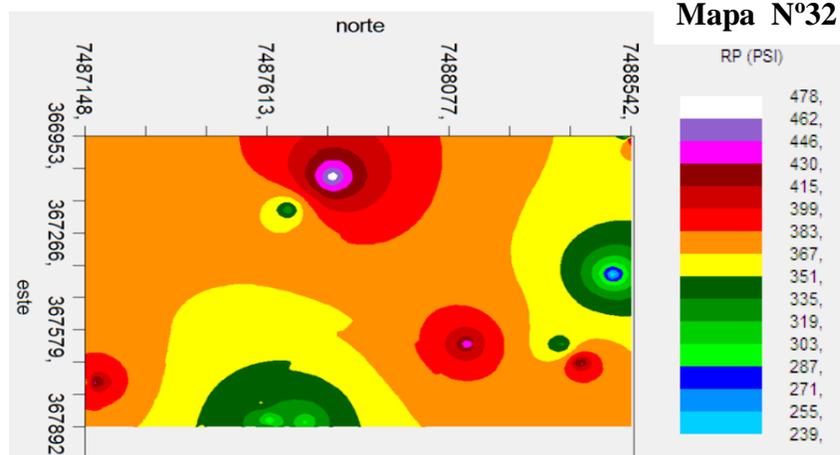


Rango: 179-475 (PSI)
 Azul, Verde, amarillo, rojo: 140- 292 ninguno
 Granate: 292-320 poco
 Magenta, violeta: 320- 348 leve

- Existen problemas de compactación poco a ninguno en las parcelas: B13-11-12-10-9; B3
- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: B7-4
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: Z1-2
- No existen problemas de compactación grave

3.2.13. VALORES MÁXIMOS

Rango: 239-478 (PSI)
 Azul – verde: 239-303 ninguno
 Verde: 303-335 poco
 Amarillo: 335-351 leve
 Naranja, rojo, granate: 351-383 moderado
 Magenta: 383+ grave



- Existen problemas de compactación poco a ninguno en las parcelas: B1; A8-A11
- Existen problemas de compactación LEVE en las parcelas: B2
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: B3;B9-1; B14; B8-2
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas: B13-11-12-10-9; B7-4; Z1; Z1-2; Z1-3; 1

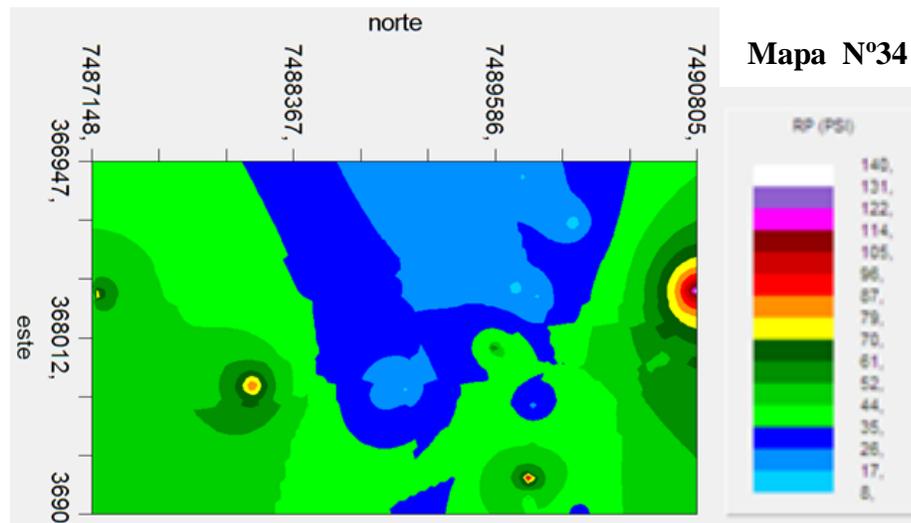
3.3. SUB ZONA NORTE

Sud zona: Norte	Numero de parcelas: 30	Extensión:
------------------------	-------------------------------	-------------------



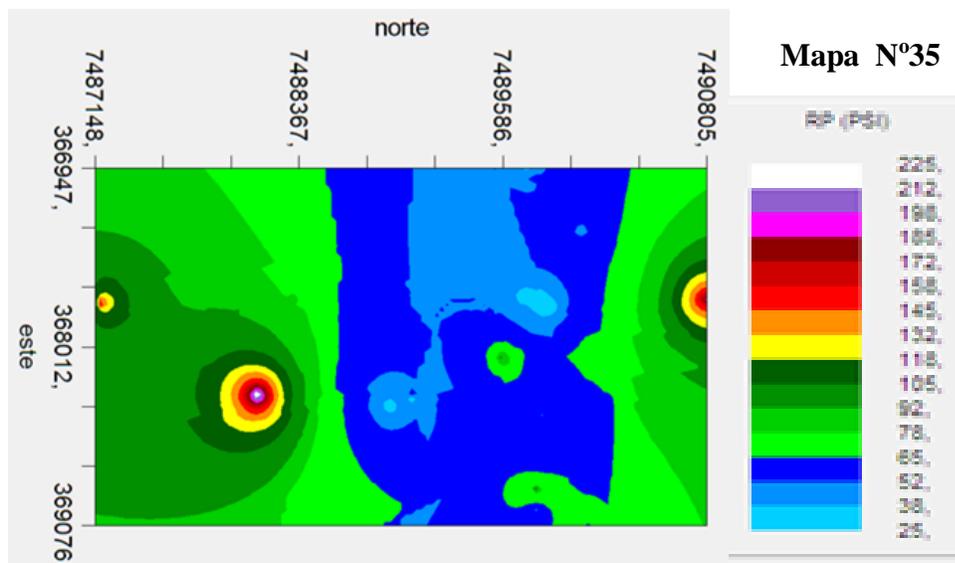
Mapa N°33.- Zona norte

3.3.1. PROFUNDIDAD DE 2.5 CM.



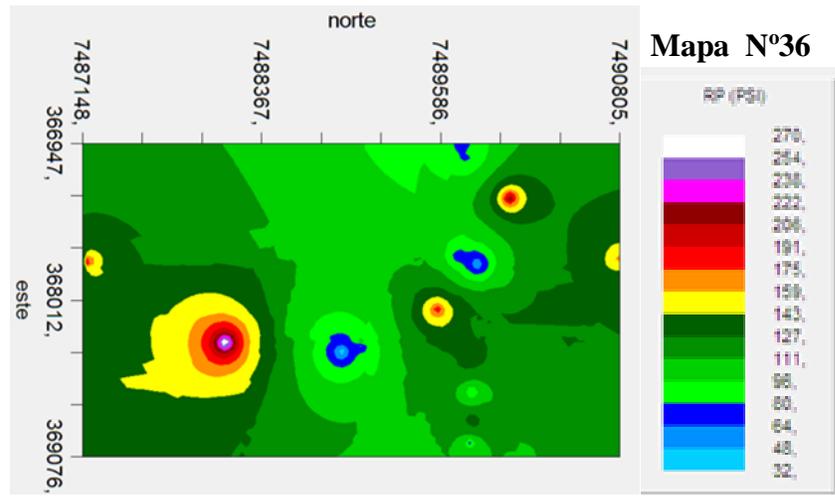
A los 2.5 cm de profundidad se puede observar un suelo sin problemas de compactación

3.3.2. PROFUNDIDAD DE 5 CM.



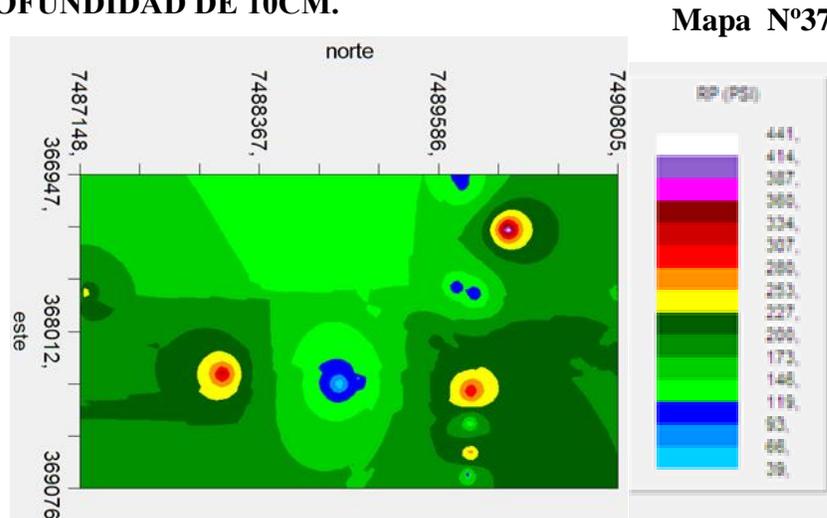
A los 5 cm de profundidad tampoco se presentan problemas de compactación

3.3.3. PROFUNDIDAD DE 7,5 CM.



Desde la profundidad inicial, 2.5cm, 5cm, 7.5 cm no se observan ningún tipo de problemas.

3.3.4. PROFUNDIDAD DE 10CM.



Rango: 179-441 (PSI)

Azul Verde Amarillo: 29-280

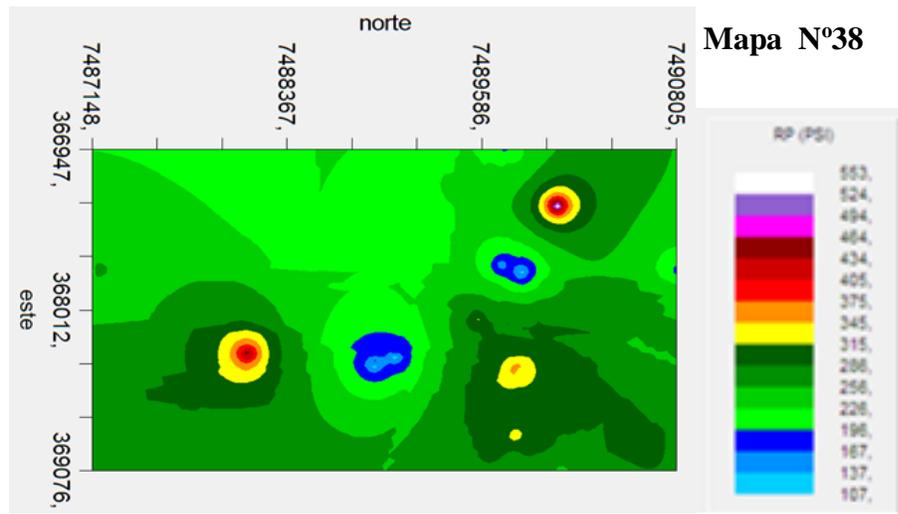
Naranja-rojo 280-307-334

Granate: 334-360

Magenta: 375+

- Existen problemas de compactación poco en las parcelas: C1 y AR3-5
 - Existen problemas de compactación leve en las parcelas: CJ2; AR2-2
 - Problemas de compactación moderado en las parcelas: AR1-2; BR1-4
- No se presentan valores graves de compactación

3.3.5. PROFUNDIDAD DE 12.5 CM



Rango: 107-553 (PSI)

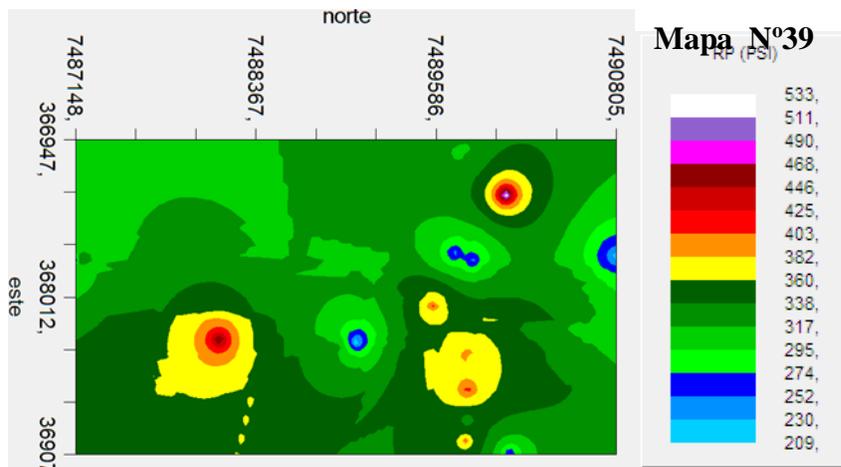
Azul Verde Amarillo: 315-345 leve

Naranja-rojo 345-75 moderado

Guindo Lilas: 375+ grave

- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: C1; AR2-2; AR3-5; AR3-6; BR-5
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: AR3-5
- Existen problemas de compactación grave en las parcelas: C5; AR1-2; BR1-4;

3.3.6. PROFUNDIDAD DE 15 CM



Rango: 209-533 (PSI)

Azul Verde 209-360

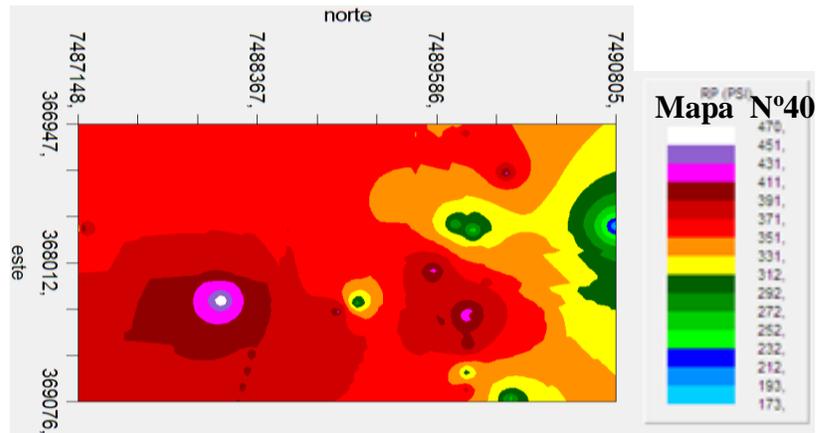
Amarillo Naranja: 360-382

Rojo, granate: 382+

- Existen pocos problemas de compactación en las parcelas: AR-1-4A; C4

- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: C1; AR1-2
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: BR-5; L4
- Existen problema de compactación grave en las parcelas: C5; AR1-2; BR1-4; L1

3.3.7. PROFUNDIDAD DE 17.5CM



Rango: 173- 470 (PSI)

Azul Verde 173- 312 poco a (ninguno)

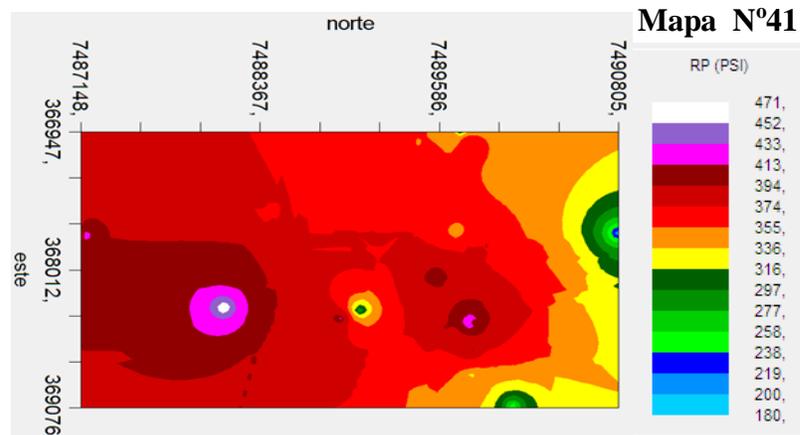
Amarillo Naranja: 313-351 (leve)

Rojo, granate: 351-371 (moderado)

Magenta: 382+ (grave)

- Existen pocos problemas de compactación en las parcelas: AR-1-4A; C4; AR3-4; AR3-5; AR3-6;
- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: C2; ; AR-3
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: BR-5; L4
- Existen problema de compactación grave en las parcelas: C1; C5; CJ2; AR1-2; AR2-2; AR3-4; AR3-7; BR1-4; L1

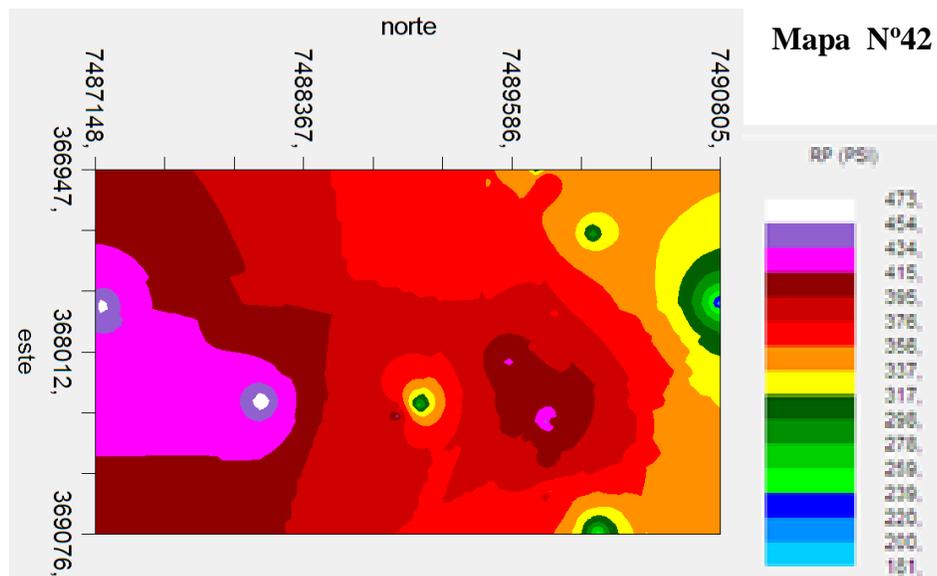
3.3.8. PROFUNDIDAD DE 20 CM



Rango: 180-471 (PSI)
 Azul Verde 180-297 (ninguno)
 Amarillo Naranja: 297-355 (poco y leve)
 Rojo, granate: 355-394 (moderado)
 Magenta: 394+ (grave)

- Existen pocos problemas de compactación en las parcelas: C-0; C-3; C J 3
- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: BR1-5; AR-3; AR3-7; BR-5;
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: C2; C4; AR3-6
- Existen problema de compactación grave en las parcelas: C-0; C1; C5; CJ2; AR1-2; AR2-2; AR-3; AR3-4; AR3-7; BR1-4; L1

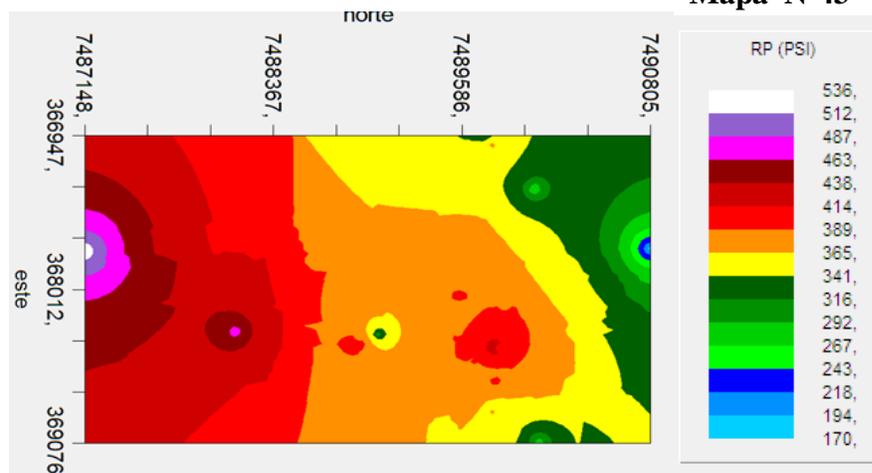
3.3.9. PROFUNDIDAD DE 22,5 CM



Rango: 181-483 (PSI)
 Azul Verde 181-317 (poco)
 Amarillo Naranja: 317-356 (leve)
 Rojo- Granate: 356-395 (moderado)
 Magenta: 395+ (grave)

- Existen problemas de compactación LEVE en las parcelas: BR1-5
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: C2; C4; AR3
- Existen problema de compactación grave en las parcelas:
- C1; C5; CJ2; AR1-2; AR2-2; AR-3; AR3-4; AR3-6; AR3-7; BR1-4; L1

3.3.10. PROFUNDIDAD DE 25 CM



Rango: 170-536 (PSI)

Azul Verde 170-341 poco

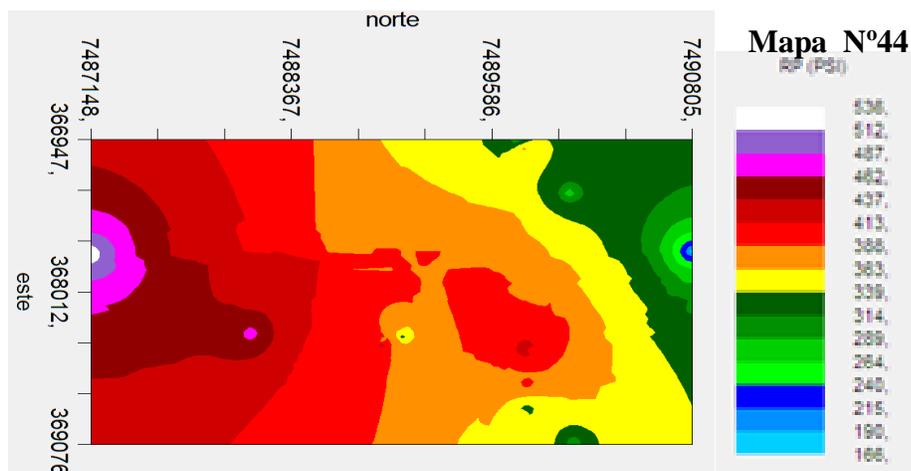
Amarillo Naranja: 341-365 leve

Rojo, Granate: 365- 389 moderado

Magenta, violeta: 389 + grave

- Problemas de compactación moderado en las parcelas: C2; C-3; C4; AR3
- Existen problema de compactación grave en las parcelas: C1; C5; CJ2; AR1-2; AR2-2; AR3-4; AR3-6; AR3-7; BR1-4; L1

3.3.11. PROFUNDIDAD DE 27.5 CM



Rango: 166-536 (PSI)

Azul Verde 166-339 ninguno - poco

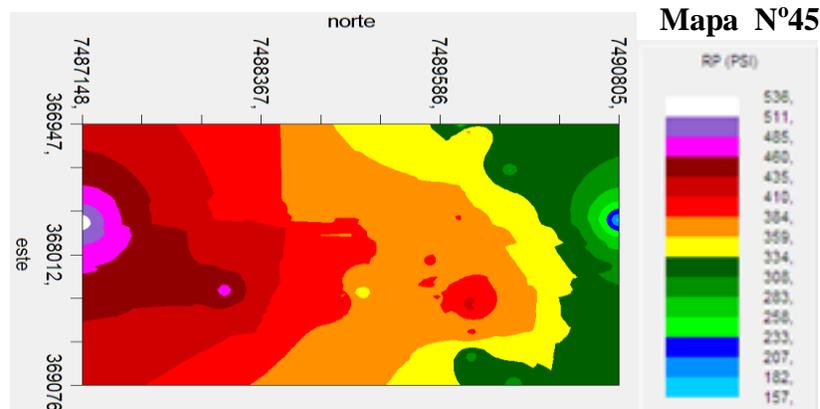
Amarillo Naranja: 339-388 moderado - leve

Rojo-Granate: 388-462 grave

- Existen poco a ningún problema de compactación en la parcela: AR3-9

- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: C4;
- AR-3; BR1-5; AR3-7
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: C2; C-3;
- Existen problema de compactación grave en las parcelas: C1; C5; CJ2; AR1-2; AR2-2; AR3-4; AR3-6; AR3-7; BR1-4; L1

3.3.12. PROFUNDIDAD DE 30 CM



Rango: 157-536 (PSI)

Azul Verde 157-334

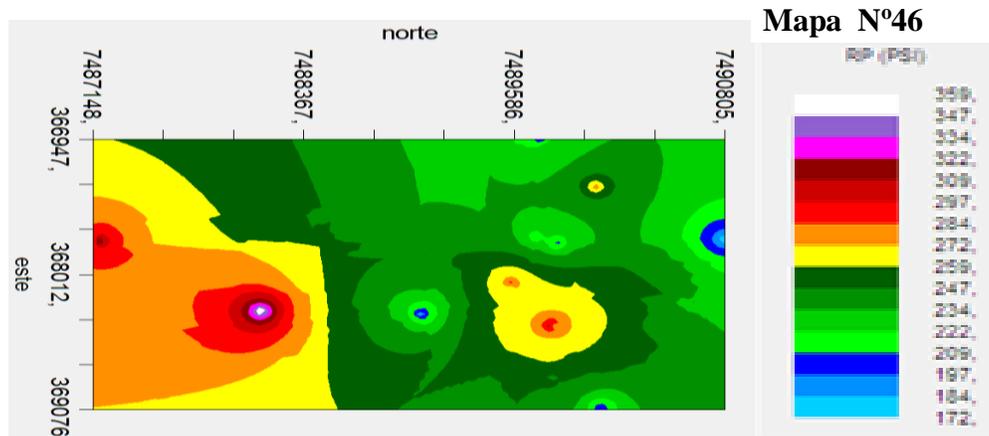
Amarillo Naranja: 334-384 (moderado)

Rojo-Granate: 384-460 (grave)

Magenta: 460+

- Existen poco a ningún problema de compactación en las parcelas: AR-1-3A; CJ2; AR3-7; AR3-9-
- Existen problemas de compactación leve en las parcelas: AR-3; BR1-5
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: C2; C-3; C4
- Existen problema de compactación grave en las parcelas: C1; C5; AR1-2; AR2-2; AR3-4; AR3-6; AR3-7; BR1-4; L1

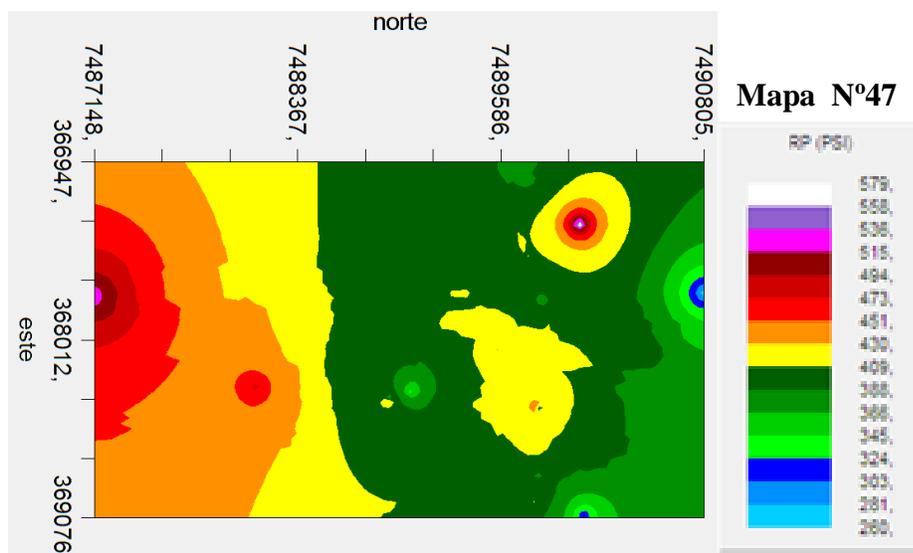
3.3.13. PROMEDIO DE DUREZA



Rango: 172-359 (PSI)
 Azul Verde 172-259
 Amarillo Naranja: 259-284
 Rojo-Granate: 284-322
 Magenta 322+

- Existen poco a ningún problema de compactación en las parcelas: C5; CJ2; L1
 - Existen problemas de compactación LEVE en las parcelas: C1; AR1-2; AR2-2
 - Problemas de compactación moderado en las parcelas: BR1-4
- En promedio total no se presentan problemas graves de compactación.

3.3.14. VALORES MÁXIMOS



Rango: 260-579 (PSI)
 Azul: 260-324
 Verde: 324-409
 Amarillo Naranja: 409-451
 Rojo-Granate: 451-515
 Magenta: 515+

- Existen poco a ningún problema de compactación en las parcelas: AR-1-3A; AR3-9
- Existen problemas de compactación LEVE en las parcelas: BR1-5; AR3-5;
- Problemas de compactación moderado en las parcelas: C2; C3; C4; BR-5; L4
- Existen problema de compactación grave en las parcelas: C-0; C1; AR-1-4A; C5; CJ2; C J 3; BR6-10; AR1-2; AR2-2; AR-3; AR3-4; AR3-6; AR3-7; BR1-4; L1; L2

Al elaborar los mapas de dureza se obtuvo lo siguiente:

Profundidad 30cm			
Porcentajes			
Grados	Zub-zona sud	Sub-zona central	Sub-zona norte
Total de parcelas	67	17	30
Grave	37,31 %	23,5 %	40 %
Moderado	2,99 %	11,8 %	10 %
Leve	7,46 %	5,9 %	6,7 %
Poco	8,99 %	11,8 %	13,3 %
Nada	43,28 %	47 %	30 %

Cuadro N° 5: Porcentajes.- Profundidad 30 cm (elaboración propia)

Porcentaje total			
Total de parcelas con problemas grave a moderado	40,3 %	35,3 %	50 %
Total de parcelas con problemas leves	16,42 %	17,7 %	20 %
Parcelas sin problemas de compactación	43,28 %	47 %	30 %

Cuadro N° 6: Porcentaje de incidencia por zonas (elaboración propia)

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES:

- El objetivo principal del presente estudio fue determinar la resistencia a la penetración en el suelo
Este estudio ha demostrado que, en general más del 35,5% de los suelos presentan problemas graves de compactación.
- Al elaborar los mapas de dureza se llega a las siguientes conclusiones:
Se afirma que existe compactación en el módulo Agrícola del ingenio, de las 3 sub-zonas muestreadas, la zona norte presenta 50% de sus parcelas con problemas graves de compactación, estas parcelas deben ser sometidas lo antes posible a un tratamiento para reducir su grado de compactación.
La sub-zona central es la que menor grado de compactación presenta, con 35.3% del 100% de las superficies que fue tomada en estudio.
- Una compactación severa puede causar una pérdida de rendimiento de hasta un 40%, sin embargo, se estima que en promedio la compactación reduce el potencial de rendimiento entre un 10 a 20%.

4.2. RECOMENDACIONES:

- La única forma de encarar este problema es reduciendo la presión sobre el suelo. Y esta tarea recae sobre los neumáticos. Los neumáticos de alta flotación son la solución para reducir la compactación del suelo y preservar su productividad. Puede que no sea posible reparar los daños causados por una compactación del suelo excesiva. Sin embargo, en el futuro este problema puede evitarse o controlarse usando neumáticos que ayuden a reducir esta tendencia.
- La primera y principal regla a seguir para reducir la compactación del suelo es no trabajar nunca con máquinas sobre terreno mojado. No importa si las máquinas y herramientas están sobre avanzados neumáticos o vías de baja presión. El terreno mojado se compacta fácilmente, de forma severa e irreversible.
- Una forma rápida de solucionar este problema es incorporar un descompactador hidroneumático a una maquinaria agrícola habitual. El descompactador permite trabajar la tierra de forma más eficiente y a una mayor profundidad. Además, está preparado para trabajar sobre cualquier tipo de terreno independientemente de su composición.
- Es conveniente llevar un historial de manejo sobre las parcelas, cuándo se realizaron labores de labranza vertical (uso de cincel o subsolado). De igual manera; es altamente recomendable realizar habitualmente diagnósticos acerca del grado de resistencia a la penetración y/o estado de la densidad aparente que existe en los suelos.
- Algunas recomendaciones adicionales y que llevan mucho más tiempo pero a la vez suelen ser más eficaces es el uso del control biológico, como la incorporación de materia orgánica, cubiertas vegetales, renovar con mayor frecuencia el cultivo.
- También se recomienda realizar un mapa cartográfico al módulo con el fin de tener un estudio más preciso de la zona
- Se recomienda ampliar este estudio en las zonas donde se encontraron mayores problemas de dureza, con el fin de proporcionar un diagnóstico más preciso.