

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

**Rendimiento y distribución de raíces de ballica bianual
en distintos niveles de fertilización fosforada en un
Andisol.**

Tesis presentada como
parte de los requisitos
para optar al grado de
licenciado en Agronomía.

Jorge André Santana Fínlez

Valdivia-Chile
2007

PROFESOR PATROCINANTE

Dante Pinochet T.

Ing. Agr., M. Sc Ph.D.

PROFESORES INFORMANTES

Ricardo Fuentes P.

Ing .Ag., M. Sc.

Roberto Mac Donald H.

Ing. Agr M. Sc.

INSTITUTO DE INGENIERÍA AGRARIA Y SUELOS

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos más sinceros a mi madre, que con todo su esfuerzo fue capaz de hacerme este regalo tan grande y tan importante como es el ser un profesional. Estaré en deuda una vez más, pero espero retribuirle cada uno de los minutos que de una u otra forma entregó para mí, siendo un hombre correcto, para que se sienta más orgullosa. A mi herma y mi padre por su apoyo incondicional. Al amor de mi vida Daniela por acompañarme en esos momentos difíciles y darme su alegría y más aun por ese enorme montón de felicidad que es nuestro hijo Julián. A mis amigos del alma junto a los que viví momentos muy felices (Frez, metal, Carolina, yoya, Eduardo, frutilla, Daniel, Oveja, Mario, Molina, luna, Coke, y etc, etc.) un abrazo para todos los que alguna vez compartieron mis pasos por esta hermosa y maravillosa Universidad.

Jorge A Santana Finlez

INDICE DE MATERIAS

| Capítulo | | Página |
|----------|--|--------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2 | REVISION BIBLIOGRAFICA | 4 |
| 2.1 | Sistema radical de las plantas | 4 |
| 2.1.1 | Funciones básicas | 4 |
| 2.1.2 | Desarrollo radical | 4 |
| 2.1.3 | Clasificación de los sistemas radicales | 5 |
| 2.2 | Crecimiento radical | 7 |
| 2.2.1 | Efecto del fósforo sobre el desarrollo radical | 8 |
| 2.3 | Medición radical | 9 |
| 2.3.1 | Desarrollo radical | 9 |
| 2.3.2 | Longitud radical | 10 |
| 2.4 | WinRHIZO | 12 |
| 2.4.1 | Características de WinRHIZO | 12 |
| 2.5 | Método de las intersecciones | 14 |
| 2.6 | Andisoles | 15 |
| 3 | MATERIAL Y METODO | 17 |
| 3.1 | Material experimental | 17 |
| 3.2 | Muestreo de la parte aérea de la ballica bianual | 17 |
| 3.3 | Diseño experimental para la medición de raíces de ballica bianual creciendo en distintos niveles de P | 18 |
| 3.4 | Manejo del experimento de crecimiento de raíces | 18 |
| 3.4.1 | Tratamientos de niveles de fósforo | 18 |
| 3.4.2 | Establecimiento del ensayo y variedad utilizada | 19 |
| 3.4.3 | Sitio del ensayo | 19 |

| Capítulo | Página | |
|-----------------|---|-----------|
| 3.4.4 | Características climáticas en el periodo experimental | 21 |
| 3.4.5 | Muestreo de las raíces de ballica anual a través de los cortes | 22 |
| 3.4.6 | Medición de la densidad de longitud radical | 22 |
| 3.4.7 | Calibración de WinRHIZO | 22 |
| 3.5 | | 25 |
| 3.5.1 | | 25 |
| 4 | PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 27 |
| 4.1 | Biomasa aérea | 27 |
| 4.2 | Biomasa radical | 28 |
| 4.2.1 | Producción de biomasa radical | 29 |
| 4.2.2 | Distribución porcentual de raíces | 36 |
| 4.3 | Resultados de la calibración de WinRHIZO | 37 |
| 4.4 | Medición de la densidad radical (L_V) de las raíces de ballica bianual | 40 40 |
| 4.4.1 | Muestreo 28 de Noviembre 2002 | 40 |
| 4.4.2 | Muestreo 19 de diciembre 2002 | 42 |
| 4.4.3 | Muestreo 13 de enero 2003 | 44 |
| 4.4.4 | Muestreo 27 de agosto 2003 | 46 |
| 4.4.5 | Muestreo 28 de octubre 2003 | 48 |
| 4.5 | Evaluación de la longitud radical a través del tiempo | 50 |
| 4.5.1 | Variación de la longitud radical el tiempo | 50 |
| 4.6 | Relación entre la biomasa radical y el largo de raíces (L_a) | 52 |
| 5 | CONCLUSIONES | 55 |
| 6 | RESUMEN | 56 |

| Capítulo | | Página |
|-----------------|---------------------|---------------|
| | SUMMARY | 57 |
| 7 | BIBLIOGRAFIA | 58 |
| | ANEXOS | 63 |

INDICE DE CUADROS

| Cuadros | Página |
|---|--------|
| 1 Producción de Biomasa aérea de ballica bianual (kg MS ha^{-1}) por tratamientos para las distintas fechas de corte en un andisol | 18 |
| 2 Espacio poroso y distribución de la porosidad del suelo serie Valdivia | 20 |
| 3 Caracterización química de la serie Valdivia en el lugar de establecimiento del ensayo en los primeros 20 cm de suelo | 20 |
| Resumen de fertilización | 21 |
| 4 Parámetros de la evaluación de regresión entre el rendimiento de biomasa aérea total (kg MS ha^{-1}), nivel de P. | 27 |
| 5 Producción de Biomasa Radical (kg MS ha^{-1}) por tratamientos, para las distintas fechas de corte | 28 |
| 6 Razón biomasa aérea/ biomasa radical por tratamientos ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) para las distintas fechas de muestreo | 29 |
| 7 Tasa de crecimiento ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$) de la biomasa aérea por tratamientos | 32 |

| Cuadro | | Página |
|---------------|---|---------------|
| 9 | Variación de la Biomasa Radical (kg MS ha-1) cada 10 cm de profundidad por tratamientos | 30 |
| 10 | Parámetros de regresión para las dos fechas que presentaron diferencias significativas entre tratamientos | 33 |
| 11 | Distribución porcentual de la biomasa radical de ballicas bianuales por fecha de muestreo cada 10 cm de profundidad | 37 |
| 12 | Resultado de la comparación de hilos de medidas conocidas con los valores obtenidos a distintas resoluciones por el programa WinRHIZO 2003b | 38 |
| 13 | Variación de la densidad radical L_v (cm cm ⁻³) en profundidad para distintas dosis de fertilización fosforada | 41 |
| 14 | Variación de la densidad radical L_v (cm cm ⁻³) en profundidad para distintas dosis de fertilización fosforada | 43 |
| 15 | Variación de la densidad radical L_v (cm cm ⁻³) en profundidad para distintas dosis de fertilización fosforada | 45 |
| 16 | Variación de la densidad radical L_v (cm cm ⁻³) en profundidad para distintas dosis de fertilización fosforada | 47 |
| 17 | Variación de la densidad radical L_v (cm cm ⁻³) en profundidad para distintas dosis de fertilización fosforada | 49 |

| | | |
|----|---|----|
| 18 | Variación de la longitud radical total L_a (km m^{-2}) para las distintas fechas de muestreo | 50 |
| 19 | Parámetros de la evaluación de regresión Biomasa radical (g MS) versus L_a (km m^{-2}) | 53 |

INDICE DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|---------------|--|---------------|
| 1 | Esquema cama de clavos utilizada para la extracción de raíces de ballica | 2 |
| 2 | Valores de longitud radical de ballica utilizando ambas metodologías de medición | 39 |
| 3 | Variación de L_a en distintas fechas de muestreo para todos los tratamientos | 51 |

INDICE DE ANEXOS

| Anexo | Página |
|--|--------|
| 1 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de noviembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $0 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 64 |
| 2 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de noviembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $55 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 65 |
| 3 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de noviembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 66 |
| 4 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de noviembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $220 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 67 |
| 5 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 19 de diciembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $0 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 68 |
| 6 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 19 de diciembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $55 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 69 |
| 7 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 19 de diciembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 70 |

| Anexo | Página |
|--|---------------|
| 8 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 19 de diciembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $220 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 71 |
| 9 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 13 de enero con sus tres repeticiones para el tratamiento de $0 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 72 |
| 10 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 13 de enero con sus tres repeticiones para el tratamiento de $55 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 73 |
| 11 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 13 de enero con sus tres repeticiones para el tratamiento de $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 74 |
| 12 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 13 de enero con sus tres repeticiones para el tratamiento de $220 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 74 |
| 13 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 27 de Agosto con sus tres repeticiones para el tratamiento de $0 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 75 |
| 14 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 27 de Agosto con sus tres repeticiones para el tratamiento de $55 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 76 |
| 15 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 27 de Agosto con sus tres repeticiones para el tratamiento de $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 77 |
| 16 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 27 de Agosto con sus tres repeticiones para el tratamiento de $220 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 78 |

| Anexo | Página |
|---|---------------|
| 17 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de octubre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $0 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 79 |
| 18 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de octubre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $55 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 80 |
| 19 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de octubre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 81 |
| 20 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de octubre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $220 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ | 82 |

1 INTRODUCCIÓN

Las raíces de las plantas son el órgano especializado para absorber nutrientes y agua desde la solución del suelo. Las primeras ideas sobre la importancia de las raíces llevaron a plantear un equilibrio morfológico entre la parte radical y la parte aérea. Es decir, se partía del supuesto que mientras más raíces poseían mayor era el crecimiento de la parte aérea. Posteriormente este concepto fue desafiado a través de lo que se conoce como el equilibrio funcional. Es decir, que más importante que la cantidad de raíces eran las funciones que estas cumplían para las necesidades de las plantas. Ello permitió explicar el crecimiento adecuado de plantas en volúmenes restringidos de suelos.

En el establecimiento de los equilibrios funcionales se le ha dado mucha importancia a los conceptos de sincronía y sinlocación. Estos conceptos se refieren a la concordancia en el tiempo (sincronía) y en el espacio (sinlocación) del crecimiento y función radical con las necesidades de la tasa de absorción del cultivo. La importancia relativa de estos dos conceptos varía dependiendo del nutriente. En el caso del N, dada la movilidad de los nitratos en el suelo, es muy importante la sincronía entre el crecimiento radical y la absorción de N, ya que las plantas deben tener sistemas que profundicen para alcanzar los nitratos en las distintas profundidades del suelo. En el caso de nutrientes poco móviles como el P, es muy importante la sinlocación, ya que es más importante la exploración del espacio enraizado donde está localizado el nutriente que la sincronía en el tiempo entre el crecimiento radical y la movilidad del nutriente.

La intensidad de exploración del espacio se mide en un parámetro llamado densidad de la longitud radical (densidad radical), el cual da una

medida de la intensidad de exploración de un volumen de suelo. Se mide en cm de raíz por cm^3 de suelo explorado.

El parámetro densidad radical es variable dependiendo del tipo de cultivo que se estudie y de las condiciones de suelo en que se realiza el estudio. Además, se debe estudiar en condiciones de campo para integrar todas las variables que influyen en el parámetro.

Se ha postulado que el fósforo es uno de los nutrientes que tiene mayor influencia en el crecimiento radical, sin embargo, en Chile existen pocos trabajos enfocados al evaluar y cuantificar el desarrollo radical en condiciones de campo y la mayoría de los existentes abarcan estudios sobre propiedades físicas de los suelos y la influencia de estas sobre el desarrollo radical, pero muy pocos sobre las características químicas de los suelos y su participación en el desarrollo de las raíces.

La hipótesis de este trabajo es que el nivel de disponibilidad de fósforo del suelo determina el crecimiento y la exploración de los volúmenes de suelo que realizan las raíces de un cultivo de ballica bianual. Es por eso que el objetivo general de este trabajo es cuantificar la densidad radical de una ballica bianual en condiciones de campo bajo distintos niveles de fósforo en un Andisol. Los objetivos específicos son:

Determinar la variación de la densidad radical en profundidad de un cultivo de ballica creciendo en distintos niveles de disponibilidad de P.

Establecer las variaciones de la relación entre la biomasa radical y la densidad de longitud radical del cultivo de ballica bianual.

Determinar la variación de la densidad radical a través del tiempo del cultivo de ballica bianual creciendo en distintos niveles de disponibilidad de P en el suelo y por ultimo determinar la relación biomasa radical longitud radical.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistema radical de las plantas.

La morfología de los sistemas radicales y la profundidad de enraizamiento en un suelo varían de una especie a otra. Dependen de un patrón de crecimiento radical de la especie, el cual es modificado por diversos factores del suelo.

2.1.1 Funciones básicas. Es a través de las raíces que las plantas superiores están en contacto con los suelos, que contribuyen a la fuente de mayor parte de sus elementos nutricios minerales esenciales (FULLER,1984). Según MENGUEL Y KIRKBY (1982), las raíces cumplen tres funciones fundamentales para el desarrollo de las plantas, estas son (a) el anclaje de la planta, (b) la absorción y la translocación de agua y nutrientes y (c) la síntesis de fitohormonas y otros compuestos orgánicos.

Para cumplir estas funciones las plantas necesitan aumentar la superficie de absorción por parte de las raíces. Según STRATBURGER (2000), el aumento de la superficie se produce por el hecho de que la epidermis no cutinizada (rizodermis) de las raíces jóvenes producen un denso revestimiento de pelos radicales. Dichos pelos pueden alcanzar una gran longitud, son unicelulares y cada uno de ellos correspondió a una célula rizodérmica desarrollada (lateralmente) de manera tubular.

Además de la fijación, absorción, anclaje y conducción, las raíces asumen a menudo otras funciones. Son el lugar de la síntesis de importantes sustancias vegetales, como hormonas (giberelinas, citoquininas), que influyen en el crecimiento de las mismas.

2.1.2 Desarrollo radical. El sistema de raíces de una planta superior comienza en el embrión de la semilla. Después que ésta absorbe agua y se reactivan sus procesos fisiológicos, la radícula o raíz embrionaria sale fuera de la semilla para producir la raíz primaria de la nueva planta (STRASBURGER, 2000). Los primeros intentos para comprender como se desarrollan las plantas y su relación con el crecimiento de la parte aérea se explican por una relación directa entre el crecimiento radicular y el brote (parte aérea) lo que se denominó como “equilibrio morfológico” lo que finalmente fue refutado más tarde por el concepto de “equilibrio morfológico” el cual se encuentra ligado a la regulación hormonal, en el desarrollo de la planta, por ejemplo la hormonas producidas por los meristemas radicales pueden afectar el crecimiento del brote y viceversa, en donde la absorción de nutrientes y agua en cantidades inadecuadas puede limitar el crecimiento de la planta. En respuesta a ello la planta puede regular la producción de un flujo extra de hormonas. Por otro lado también se habla de una regulación externa al desarrollo de la planta o “influencia ambiental” esta es la respuesta a los factores externos que dependen de la situación interna, es decir energía, concentración de nutrientes, potencial de agua, y hormonas en el interior de la planta. Según Goedewaagen (1937) citado por NOORDWIJK Y WILLINGER (1987) existe una idea más global entre estos dos conceptos que se podría asociar mejor a lo que ocurre en el caso de las praderas la cual habla de un “Equilibrio funcional”, aquí se hacen dos distinciones para explicar el aumento en la tasa de absorción de nutrientes, que puede asumirse como una respuesta morfológica o sea un mayor crecimiento radicular; y una respuesta funcional a la actividad extra o sea una captación extra en la captación por unidad de raíz. Estas consideraciones desde este punto de vista y la demostración de una regulación activa por parte de la planta para restaurar el balance de la relación brote/raíz después de la disturbación al remover un órgano vegetal, lo cual condujo a este concepto de “Equilibrio funcional” entre la raíz y la biomasa aérea en respuesta a la condición ambiental. Esta relación en el crecimiento de la parte aérea y radical es vista cuando se produce un estrés

de carbohidratos en una planta creciendo sin condiciones restrictivas en lo que se refiere a la nutrición de la planta en donde esta favorece el crecimiento de las hojas en desmedro del crecimiento del tallo y de las raíces. En el caso contrario o sea cuando existe una deficiencia en la nutrición de la planta y la provisión de carbohidratos es la adecuada la prioridad en el uso del carbono asimilado por la fotosíntesis es revertida para generar crecimiento en la zona radical. Por esto el equilibrio funcional se fundamenta en un equilibrio dinámico, es decir en el momento que cesa el factor que influenció el cambio en el crecimiento de la planta, este es revertido a la situación inicial.

Según Kang (2004) citado por MIRANDA (2004), en estudios con soluciones nutritivas se observó que el aumento en la concentración de nutrientes afecta la proporción entre la parte aérea y las raíces, tanto que al aumentar la concentración de fertilizantes se produce un aumento importante en esta relación, incrementándose en función del estado fonológico de la planta.

No sólo de la condición nutricional del suelo depende el crecimiento radical este según ACEVEDO, (1979) es un proceso que depende de la elongación celular, por lo cual el agua tiene una participación fundamental, al proporcionar la fuerza que produce la expansión. El suelo participa generando una impedancia mecánica la cual que es la resistencia que ofrece la matriz del suelo contra la deformación por el crecimiento radical, así, la elongación de la raíz sólo ocurre cuando la presión radical excede a la impedancia mecánica. Esta propiedad del suelo a su vez depende de la porosidad, densidad aparente, contenido de agua, textura continuidad de los poros, tamaño de los agregados, macroestructura, y materia orgánica (BOX, 1996). Estudios realizados por Kaush (1968) citado por ELLIES y RAMIREZ (1992) sobre el efecto de la densidad aparente en el crecimiento radical de muestran que en suelos compactados con altas densidades aparentes, el sistema radical tiene frecuentemente un desarrollo superficial poco ramificado. Ello hace que el

cultivo se mas susceptible a la sequía y con baja utilización de nutrientes. El experimento realizado con una ballica anual demostró una disminución en la producción de biomasa aérea, a mayor densidad aparente.

En resumen se puede decir que el desarrollo del sistema radical esta asociado directamente con el desarrollo de la parte aérea, por un lado presentan una dependencia mutua en el crecimiento, como también desarrollan una relación competitiva por la distribución de agua, nutrientes y sustancias fotosintéticas, con lo cual las raíces y las plantas crecen en una proporción relativamente estable regulados por mecanismos fisiológicos internos de estas. Cambios en las condiciones ambientales pueden romper este equilibrio cambiando el sentido del desarrollo, vale decir favorecido el crecimiento radical con una disminución del crecimiento de la parte aérea y viceversa (Jones, 1992 citado por PEILING *et al.*, 1999).

2.1.3 Clasificación de los sistemas radicales. Existen diversas formas de clasificación de las raíces. Esto es reafirmado por KEPPLER Y RICKMAN (1990), los cuales señalan que estos se pueden clasificar según su longevidad, distinguiendo entre raíces viejas y nuevas. También se pueden diferenciar entre raíces seminales y raíces definitivas. Este sistema de clasificación difiere con el que plantean los botánicos los cuales usan básicamente dos sistemas de clasificación; Primero una raíz principal que se ramifica en raíces secundarias menos desarrolladas. Este tipo de raíz es típico de las plantas Gimnospermas y angiospermas Dicotiledóneas, llamado "Alorrizia" o raíz "Axonomorfa", este tipo de raíz se origina directamente de la radícula del embrión, presente crecimiento secundario en grosor si la planta es leñosa. El segundo tipo correspondió a un tipo de raíz que es llamada raíz "Homorrizia" en la cual no hay una raíz principal. Este sistema de raíz esta formado por un conjunto de raíces de igual grosor y tamaño. No presentan crecimiento secundario en grosor y son caulogenas, es decir se origina directamente del tallo, ya que en este caso la

radícula del embrión no continúa su desarrollo (STRATBURGER, 2000). Este último es típica de las plantas monocotiledóneas en las cuales se encuentra la familia *Poaceae* o gramíneas (Rodríguez 1993).

2.2 Crecimiento radical.

Según Marschner (1995), existen dos zonas meristemáticas principales en las cuales se produce el crecimiento en las raíces, es aquí en donde se produce el proceso de división celular y por ende el proceso de expansión. Es en este preciso lugar en donde se reciben las señales transmitidas por las diversas capas de la raíz traduciéndose en un crecimiento radical. Este crecimiento es el que está directamente asociado al aumento de la densidad radical (unidad de longitud / unidad de volumen); participando además la zona de los pelos radicales y las raíces laterales. La primera correspondió a una zona de células epidermales elongadas, estos son de corta vida y colapsan después de algunos días, siendo el etileno uno de los responsables de la formación de estos pelos radicales. La importancia de estos pelos radicales radica en su capacidad de poner en contacto un mayor volumen de suelo, lo que favorecerá la absorción de nutrientes y por ende el desarrollo de la planta (MENGUEL y KIRKBY, 1982, MARSCHNER, 1995). Por otro lado las raíces laterales se forman a partir del periciclo de la raíz y su desarrollo es influido por factores ambientales (existencia de nutrientes, tipo de rizosfera e impedimentos físicos) y controlado por fitohormonas, principalmente ácido indol acético (AIA) y citoquininas Marschner, 1995 citado por MIRANDA (2004).

Según Radermacher y Klämbt, 1993 citado por MARSCHNER, (1995) El ácido indol acético en bajas concentraciones mejora la extensión celular, esto mediante un estímulo recibido a nivel del ápice radical en la zona de células llamadas rizodermas.

Existe otra fitohormona que participa dentro del proceso de elongación celular llamado Acido Abscísico (ABA), en estudios realizados por MARSCHNER, (1995) se determinó una relación inversa al crecimiento radical, o sea mientras menos crecía la concentración de esta fitohormona era mas alta o viceversa sin ser necesariamente un efecto inhibitorio del crecimiento.

2.2.1 Efecto del fósforo sobre el desarrollo radical. Las plantas son capaces de modificar su sistema radical, fisiológicamente, morfológicamente y topológicamente. En condiciones de estrés de fósforo, la formación de pelos radicales, y la disminución del diámetro radical juegan un papel muy importante, ya que ocasionan un aumento en el área superficial de absorción, permitiendo ocupar un mayor volumen de suelo he incrementar la absorción de fósforo (FÖHSE et al., 1991; GAHOONIA y NIELSEN, 1996). Estas respuestas provocan cambios como bifurcación de las raíces laterales, aumentando la tasa de elongación y provocando cambios en la densidad radical (Bates y Lynch, 1996; citado por MA et al, 2003). Estas respuestas van asociadas a cambios en los procesos bioquímicos y metabólicos que actúan en conjunto, lo que representa una repuesta adaptativa, para ayudar al crecimiento durante un deficiencia en la nutrición de la planta, principalmente por elementos altamente retenidos por la matriz del suelo (Lewis y Quirk, 1967; Bhat y Nye, 1974; citados por MA et al, 2003)

2.3 Medición radical.

La cuantificación de los sistemas radicales es esencial para la evaluación de las funciones radicales y la influencia en el medio del suelo. Muchos métodos engorrosos han sido desarrollados para cuantificar los parámetros radicales. (Bhöm, 1979 citado por PAN, 1990). Estos métodos de estudio se dividen en dos grupos; los métodos *In situ* y aquellos que necesitan de la separación de las raíces del suelo dentro de este ultimo uno de los métodos comúnmente utilizado es el llamado método de las intersecciones de Newman

(1966), el cual ha sido adaptado para una cuantificación visual de raíces por TENNANT (1975). Este método radica en una relación matemática entre el largo de raíz y la frecuencia con la cual, los segmentos de raíces arregladas al azar interceptan un grilla de líneas preestablecidas. Las estimaciones del largo de raíz por el método de las intersecciones puede incluir gran cantidad de errores humanos produciendo dificultad para comparar el largo de raíces de algunas especies, cuando la determinación es en laboratorios separados o cuando se comparan diferentes métodos (SMUKER, 1995).

En los últimos años se han desarrollado nuevos métodos a base del procesamiento de imágenes computacionales. Según PAN y BOLTON (1990) estos métodos son más objetivos y sin un requerimiento humano después del proceso inicial, de procesamiento, separación y arreglo de la muestra en el dispositivo de toma de imágenes.

Estudios realizados por MURPHY y SMUKER (1995) para evaluar ambos métodos midiendo raíces de alfalfa y una ballica perenne, encontraron que ambos métodos tenían una correlación muy baja ($r^2=0,090$) para el caso de la ballica perenne, esto debido a la dificultad de medir las raíces al ser muy finas ($<400 \mu\text{m}$) lo que dificultaba que sean detectadas por el sistema de toma de imágenes. Lo cual lleva a una subestimación del material de estudio.

Los parámetros en que los sistemas radicales son comúnmente medidos son: peso de raíz, largo de raíz, superficie radical, y densidad radical.

2.3.1 Densidad radical. Según MNGUEL y KYRKBY, (1982) la densidad radicular es parámetro más importante dentro de los antes mencionados. Y este correspondió a largo de raíz (cm) por volumen de suelo (cm^3). El cual se puede expresar de la siguiente forma:

$$L_v = 2\overline{M}$$

Donde L_v es la densidad radical y M es la media aritmética del número de raíces interceptada en los ejes por unidad de área por los tres principales planos. Este representa la distribución en el espacio del sistema radicular de las especies vegetales, y presenta una importante influencia en la absorción de agua y nutrientes.

Esto en términos matemáticos más simples correspondió a:

$$L_v = \frac{\text{TotalLongitudRadical.(cm)}}{\text{volumendeSuelo}(cm^3)}$$

En general la densidad de raíces es claramente de mayor magnitud sobre la capa arable de un suelo, causada principalmente por mejores condiciones físicas, químicas y biológicas, para luego producirse una menor tasa de crecimiento radical con el incremento de la profundidad (Greenwood et al, 1982 citado por MARSCHNER, 1995). Según RODRIGUEZ (2001), el grupo de los cereales es el que presenta la mayor densidad radicular.

2.3.2 Longitud radicular. La longitud radical L_a ha sido el parámetro comúnmente más medido, por el método de las líneas de intercepción de NEWMANN (1966). Este parámetro está definido como el largo total de raíz (cm) por unidad de superficie (cm^2). La siguiente fórmula expresa su simbología matemática.

$$L_a = \frac{\text{LargoTotaldeRaiz}(cm)}{\text{Superficiesuelo}(cm^2)}$$

Desde este valor puede ser calculado, el área de la superficie de raíz. Si el promedio del diámetro de las raíces es conocido (MENGUEL Y KIRKBY, 1982).

2.4 Uso de un modelo computacional (WINRhizo) para medir raíces.

Este es un método computacional desarrollado por Regent[®] para el estudio de parámetros morfológicos de raíces, el cual trabaja con imágenes obtenidas a través de un scanner óptico, estas son analizadas por el programa, obteniendo parámetros como diámetro promedio, longitud y superficie radicular. La diferencia principal de este método con los convencionales es su fácil manejo y la rapidez de las mediciones. Según REGENT, (2005) estas últimas pueden variar dependiendo del escáner utilizado (resolución de estos), y el procesador del PC, por lo cual se hace necesario la calibración del método para cada caso en particular. Además existen dos aproximaciones que permiten mejorar la confiabilidad de la mediciones obtenidas por medio de scanner ópticos; una es el aumento de la resolución en dpi (dots per inch) de la imagen, ya que esto lleva consigo la disminución del tamaño de los píxeles lo cual permite un mayor detalle de la imagen, y la otra es teñir el material en estudio (COSTA et, al. 2001).

Las imágenes obtenida al colocar las muestras en la superficie (21.6 cm por 27.9 cm) del scanner óptico son exportadas al programa el cual realiza una discriminación por medio de un sistema binario que distingue en dos colores, el negro el cual asume un valor 0 y blanco que asume un valor 1, esto quiere decir que L_a esta afectada por la resolución utilizada, en donde la sumatoria de los píxeles asumidos como raíz, determinan los parámetros anteriormente descritos.

2.4.1 Características de WINRhizo. REGENT INSTRUMENTS (2003), destaca las siguientes características del programa para el estudio de raíces.

- WINRhizo exhibe el análisis sobre la imagen. El color dibuja el esqueleto de la raíz indica en qué clase del diámetro se ha clasificado la parte de la raíz. El mismo color se utiliza para dibujar el gráfico de la distribución de la raíz sobre la imagen.
- Las representaciones gráficas de la distribución de la longitud, el área, el volumen o el número de la raíz de extremidades, se definen en función del diámetro, basándose en el color de la raíz analizada.
- Los datos de la medida de la muestra bajo análisis se resumen en la pantalla y están disponibles detalladamente en ficheros de datos.
- El diámetro puede ser medido en un lugar específico de la raíz, y se exhibe cuando se posiciona sobre la imagen, en el lugar deseado.
- WINRhizo es extremadamente interactivo y fácil de utilizar y además las imágenes se pueden ver en diversas ampliaciones.
- La utilización de este sistema permite la toma de un número de muestras mayor que el que se logra con el sistema tradicional. Con lo cual se logra una mayor eficiencia en el uso y procesamiento de muestras.

Las raíces se pueden medir inmediatamente por WINRhizo cuando estas se extraen del suelo y se lavan de partículas. Antes del análisis, las raíces se deben primero ser llevadas a un formato digital, con un dispositivo de adquisición de la imagen o bien leerlo desde un formato de imagen (JPG, TIFF, u otro formato) adquirido a través de otro programa. La desventaja de trabajar con imágenes previamente adquiridas a través de una maquina fotográfica, es la baja resolución que se logra, en relación con el obtenido por WINRhizo, los

píxeles logrados por una imagen de fotografía son demasiado grande por lo cual no permite mediciones finas, como el diámetro de raíces. La solución a este problema es tomar un mayor número de imágenes en áreas más pequeñas. Por otro lado el explorador de 1600 dpi STD puede explorar un área máxima de las pulgadas 8.5 x 11, (cada uno con 1600 x 1600 píxeles, eso significa que puede produce una imagen de 13600 x 18720 píxeles, lo que implica que se necesitarían 85 cámaras fotográficas trabajando juntas, para lograr la misma resolución.

2.5 Método de las intersecciones.

Este método también es conocido como el método Tennat, (1975) y consiste básicamente en una bandeja transparente de dimensiones conocidas, en la cual se coloca un papel milimetrado. Luego de esto se colocan las raíces sobre el papel, para agregarle agua a la bandeja, con esto se consigue que las raíces se distribuyan al azar. Para obtener el número de intersecciones sobre el papel milimetrado se utiliza un contador de colonias con el cual se evaluar tanto horizontal como vertical mente la cantidad de veces que las raíces se sobreponen sobre las líneas.

Según Newman citado por TORO (1979) este demostró que en número de intersección entre líneas al azar trazadas sobre una superficie transparente, colocada sobre otra superficie que contiene segmentos de raíces esta asociado al largo total de raíces por medio de la siguiente formula.

$$(1) \quad R = \frac{\pi x A x N}{2 x H}$$

Donde R represente el Largo total de raíces, N es número de intersecciones, A es el área ocupada por las raíces y H es el largo total de las rectas. La densidad

radicular a su vez se conoce como la relación que existe entre la longitud y el volumen de suelo. Posteriormente esta relación se simplifico a:

$$(2) \quad R = N \times \text{Factor de longitud}$$

Este factor de longitud puede variar entre 0,393, 0,786, 1.57 y 3.93 cm por la intersección, para grillas de 0,5, 1, 2, 5 cm respectivamente.

Según ROWELL (1993) para medidas de sobre 1 m de longitud se usan grillas de 1 cm .para el muestreo de hasta 5 m se usan grillas de 2 cm y de 5 cm para longitudes de hasta 15 m.

Además cabe hacer una distinción entre los tipos de raíces que se miden, por un lado se encuentran las raíces que están intactas y por otro las segmentadas las cuales se producen por desprendimiento casual producto del la manipulación o bien de forma intencional para facilitar medición. Ahora el hecho de trabajar con raíz intacta permite tener una caracterización de las ramificaciones de esta, y el trabajar con segmentos permite acortar los tiempos de medición. (BOUMA et al. 2000).

2.6 Andisoles.

La superficie agrícola es de alrededor de 15 millones de hectáreas, con alrededor de 5.5 millones de hectárea arables, y de estas, el 45% correspondió a suelos derivados de cenizas volcánicas ubicados principalmente entre 34° y 44° S (BESOAIN, 1985). Estos suelos están conformando mayoritariamente por Andisoles. Según USDA (1975) citado por TOSSO (1985), este suelo tiende a ser franco, friable, no plásticos; usualmente con estratificaciones depocitacionales, claramente distinguibles. Se desarrollan bajo un régimen de temperatura mesico y un régimen de humedad ústico, údico, o perhúdico.

Presentan colores pardo amarillentos a pardo oscuro, altos en materia orgánica, de pH que varía entre 5,6 y 6,0, poseen coloides de carga variable de alta retención de humedad y fosfatos. La reactividad química está determinada por la presencia de Al activo, el cual puede presentarse en varias formas: alúminosilicatos de rango corto como alófan e imogolita; iones hidroxil-Al en silicatos 2:1 y 2:2; complejos Al-húmicos y Al de intercambio (Al^{+3}) en silicatos de capas (SADZAWKA Y PORTE, 1985; BESOAIN, 1999 citado por CARRASCO, 2004).

3 MATERIAL Y METODO

3.1 Material experimental

El material experimental son las raíces de un experimento que forma parte del proyecto FONDECYT 1010163 que lleva por título: “Estudio de la eficiencia de absorción de fósforo de cultivos con distintas densidades radicales”. En este trabajo se evaluaron las raíces de ballica bianual que crecieron en distintos niveles de disponibilidad de fósforo en el suelo a través del tiempo y que fueron colectadas durante cinco extracciones a través del período experimental.

Adicionalmente se midió en este experimento la biomasa aérea, la cual no forma parte de esta evaluación, pero se utilizarán sus datos para evaluar las relaciones de biomasa radical con respecto a la biomasa aérea.

3.2 Muestreo de la parte aérea de la ballica bianual. El muestreo del material aéreo se realizó a través de seis fechas de corte: 28 de noviembre; 19 de diciembre; 13 de enero; 24 de febrero; 27 de agosto; 28 de octubre, dejando 5 cm de residuo. Las muestras de raíces se sometieron a secado por aire forzado a 60° C, previamente envasadas en bolsas de papel, para luego ser pesadas en una balanza de precisión, con el fin de obtener el peso de materia seca aérea de las distintas fechas de muestreo. Los resultados obtenidos en ese análisis se muestran en el Cuadro 1.

CUADRO 1 Producción de Biomasa aérea de ballica bianual (kg MS ha⁻¹) por tratamientos para las distintas fechas de corte en un andisol.

| Fecha de corte | Dosis de P aplicado (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹) | | | |
|----------------|--|---------------|---------------|--------------|
| | 0 | 55 | 110 | 220 |
| 28-Nov | 1332 ± 330 a | 1871 ± 350 ab | 1912 ± 298 ab | 2330 ± 200 b |
| 19-Dic | 1699 ± 204 a | 1802 ± 331 a | 1970 ± 250 a | 2152 ± 197 a |
| 13-Ene | 2514 ± 160 a | 2596 ± 216 a | 2734 ± 408 a | 2834 ± 334 a |
| 14-Feb | 1035 ± 188 a | 980 ± 295 a | 1108 ± 306 a | 1460 ± 191 a |
| 27-Ago | 3296 ± 225 a | 3520 ± 730 a | 3264 ± 437 a | 2900 ± 331 a |
| 28-Oct | 4054 ± 961 a | 5079 ± 177 ab | 5486 ± 286 ab | 5634 ± 380 b |
| TOTAL | 13930±345 | 15848±350 | 16474±330 | 17310 ±276 |

3.3 Diseño experimental para la medición de raíces de ballica bianual creciendo en distintos niveles de P

El experimento fue diseñado en bloques completos al azar. Los bloques estuvieron constituidos de parcelas de 2,9 m de ancho y 20 m de largo (58 m²). Se dejó un pasillo de 2 metros entre bloques. Las parcelas de cada bloque contenían los tratamientos con los distintos niveles de fertilidad fosforada lo cual fue diseñado con tres repeticiones (foto1).

3.4 Manejo del experimento de crecimiento de raíces

3.4.1 Tratamientos de niveles de fósforo. Los tratamientos con distintos niveles de P se realizaron en base a la adición del fertilizante fosforado en la forma de anhídrido fosfórico, las cuales correspondieron: (a) una dosis sin fertilización o control, (b) una dosis de fertilización subóptima (55 kg P₂O₅), (c) una dosis de fertilización óptima (110 kg P₂O₅) y (d) una dosis de fertilización supraóptima (220 kg P₂O₅), calculadas de acuerdo al método de fertilización propuesto por RODRIGUEZ citado por PINOCHET (2000).



FOTO 1 Parcelas del ensayo.

3.4.2 Establecimiento del ensayo y variedad utilizada. Se utilizó la variedad de *Lolium multiflorum Lam*, Cultivar. Bartissimo, La cual se encuentra descrita en el registro del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), como una ballica bianual diploide, registrada por COOPRINSEM (SAG, 2005). La siembra se realizó el 8 de agosto de 2002. La preparación de suelo consistió en primer lugar a una enmienda calcaría con 4 ton/ha de Magnecal, realizada el 10 de mayo de 2002.

3.4.3 Sitio del ensayo. El sitio del ensayo se ubico en el predio experimental Santa Rosa y correspondió a un Typic Hapludand, serie Valdivia (CHILE, INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS RENOVABLES (IREN), CORPORACION DE FOMENTO (CORFO) UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE (1978); UNITED STATES DEPERTAMENT OF AGRICULTURE,(20))

CUADRO 2 Espacio poroso y distribución de la porosidad del suelo serie Valdivia.

| Profundidad (cm) | Densidad (gr cm ⁻³) | | Distribución de la porosidad (%) | | | | TOTAL (%) |
|---------------------|------------------------------------|------|-------------------------------------|-----|------|------|--------------|
| | Aparente | Real | PDR | PDL | PAU | PAI | |
| 0-20 | 0,6 | 2,36 | 28,9 | 6,2 | 17,8 | 21,5 | 74,5 |
| 20-40 | 0,6 | 2,45 | 24 | 7,9 | 22,9 | 20,7 | 75,4 |
| >40 | 0,57 | 2,45 | 27,6 | 7,5 | 25,1 | 16,4 | 76,7 |

PDR = Poros de drenaje rápido; PDL = Poros de Drenaje Lento; PAU = Poros de agua útil; PAI = Poros de Agua Inútil.

El sitio de ensayo presentó, además, las siguientes características químicas previo al ensayo (Cuadro 3).

CUADRO 3 Caracterización química de la serie Valdivia en el lugar de establecimiento del ensayo en los primeros 20 cm de suelo.

| Parámetro | Unidad | Valor |
|--------------------------------|----------|-------|
| pH al agua | | 5.57 |
| pH al CaCl₂ | | 4.79 |
| Fósforo-Olsen | ppm | 8.97 |
| Potasio intercambiable | Cmol+/kg | 0,36 |
| Sodio intercambiable | Cmol+/kg | 0,03 |
| Calcio intercambiable | Cmol+/kg | 0,50 |
| Magnesio intercambiable | Cmol+/kg | 0,17 |
| Aluminio intercambiable | Cmol+/kg | 0,32 |
| Saturación de aluminio | % | 23.86 |

Todos los análisis de caracterización química y física del sitio del ensayo se realizaron en los laboratorios del Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos de

la Universidad Austral de Chile. Las características físicas del sitio del ensayo se muestran en el Cuadro 2.

3.4.4 Manejo de fertilización del sitio del experimento. Además de los tratamientos de fertilización fosforada y para asegurar que otros nutrientes no fueran limitantes de la productividad del cultivo de ballica bianual se aplicó el siguiente manejo de fertilización y enmiendas (Cuadro 4).

CUADRO 4 Resumen de fertilización.

| Nutriente | Dosis Kg ha ⁻¹ |
|------------------|---------------------------|
| N | 390 |
| K ₂ O | 80 |
| MgO | 30 |
| Micro Nutrientes | 20 |
| Boronatocalcita | 10 |
| Magnecal | 4000 |

Dado que el pH crítico de ballicas es 5,7 (RODRIGUEZ et al., 2001) se encaló con una dosis de 4 ton ha⁻¹ de Dolomita , asumiendo que esta dosis elevará el pH de 5,57 (situación inicial) a 5,7 (situación esperada), lo que se realizó al momento de la preparación del suelo, incorporando este producto en los 20 cm de suelo. Los tratamientos de fertilización fosforada se aplicaron como superfosfato triple, incorporado al momento de la preparación del suelo.

La fertilización nitrogenada se aplicó en una dosis de 390 kg N (aplicado como nitromag durante el período de evaluación que correspondió a 14 meses y fue parcializada aplicando 90 kg N ha⁻¹ a la siembra y dosis de 60 kg ha⁻¹, después de cada de evaluación de parte aérea. Además se aplicó a la siembra,

en cada parcela los equivalentes a: 80 kg de K_2O ha^{-1} , aplicado como muriato de K, 30 kg de MgO ha^{-1} (aplicado como muriato de potasio), 20 kg ha^{-1} de micronutrientes Frölich y 10 kg ha^{-1} de boronatocalcita.

3.4.5 Manejo del control de malezas. Se realizó un cuidadoso control de malezas de forma de asegurar que las raíces colectadas correspondan a la especie estudiada. Como control de malezas se utilizaron 2 herbicidas sistémicos selectivos, aplicados en dosis de 750 g ha^{-1} en MCPA 750 AMINA, con un ingrediente activo ácido 2-metil-4-clorofenoxi-acético. Además se aplicó 4.8 g ha^{-1} de Metsulfurón Metil en el producto "ALLY" (nombre comercial).

3.4.6 Características climáticas en el periodo experimental. Según lo planteado por Huber, (1978), el clima de esta zona presenta características marítimas debido a la influencia ejercida por la cercanía del mar y por la hoya hidrográfica de los ríos Valdivia y Cruces.

Las altas precipitaciones anuales varían entre los 1800 y 3000 mm, con un promedio de 2500 mm. La distribución de estas presenta un régimen estacional siendo los meses de invierno los que presentan una concentración de las lluvias. La contraparte de esto es en la época de verano, en el cual los meses son frecuentemente secos, y las temperaturas máximas diarias ocasionalmente son superiores a los 25° C. La temperatura desciende desde comienzos de marzo hasta fines de mayo cuando los promedios diarios bajan de 10° C (MONTALDO y FUENTES, 1980), señala que las temperaturas medias anuales son del orden de los 12° C, con una oscilación térmica anual de 9.2° C, siendo enero el mes más cálido con 16.7° C y julio el mes más frío con 7,5° C respectivamente.

3.4.7 Muestreo de las raíces de ballica anual a través de los cortes. La extracción de las raíces se realizó en cinco fechas de muestreo: 28 de

noviembre; 19 de diciembre; 13 de enero; 27 de agosto y 28 de octubre. La extracción de raíces se realizó mediante el método “needleboard” (cama de agujas) o también llamado método del monolito. Este método consiste en una cama de clavos distanciados cada 5 cm el uno del otro, tanto vertical como horizontalmente (Figura 1)

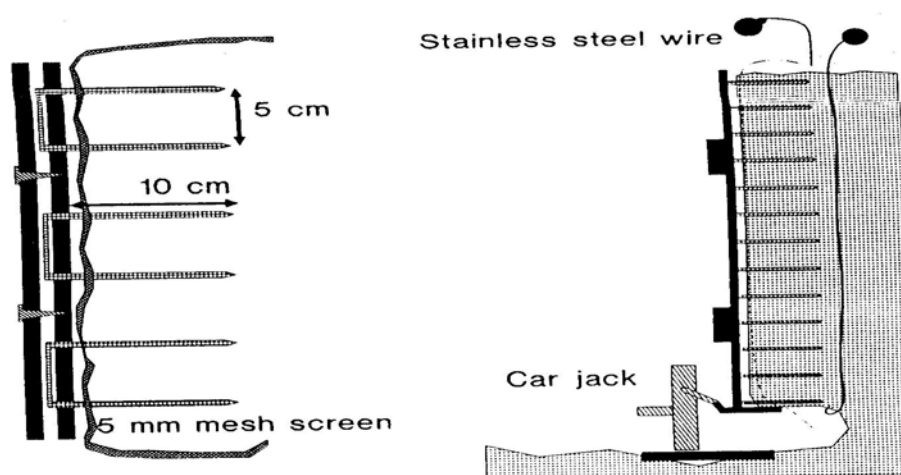


Figura 1. Esquema cama de clavos utilizada para la extracción de raíces de ballica (ANDERSON e INGRAM, 1993).

La superficie de muestreo de la cama de clavos utilizada fue de 60 cm de ancho x 125 cm de largo. En otros estudios como el de MIRANDA (2005) se utilizaron camas de 80 cm de ancho x 85 cm de largo, para la extracción de raíces de papas y arvejas, y de iguales dimensiones a las utilizadas en este trabajo para la extracción de raíces de trigo. Esto debido a la distinta profundidad de arraigamiento de los cultivos en estudio.

Esta cama de clavos fue introducida en una calicata previamente construida, en forma paralela al perfil de suelo, luego esta es empujada por medio de un equipo hidráulico hasta que los clavos penetraron dentro del perfil a una profundidad de 10 cm. Previo a esto la superficie de muestreo fue mojada para así facilitar el ingreso de los clavos. Una vez que se llevaron a cabo estos pasos. El perfil fue cortado utilizando un cable de acero hasta los

125 cm de profundidad. Una vez cumplido estos pasos el volumen de suelo es extraído, para luego ser trasladado a una cámara de frío en la cual se mantiene a 0° por periodos que van desde 5 a 7 días. En el proceso de extracción de las raíces del volumen de suelo, el monolito que contenía estas fue lavado con abundante agua hasta que el suelo fue removido por completo, quedando sólo el sistema radicular de las plantas, distribuido entre los clavos. Durante el lavado de las raíces se utilizó además una malla de 2 mm en la cual se interceptaban las raíces que se desprendían, y así no perder material de estudio. Una vez finalizado esto, se fotografiaron las muestras, con una cámara digital Sony Cybershot, DSC-P50 (Foto 2) y posteriormente se cortaron cada 5 cm de profundidad. Y se secaron en un horno de ventilación forzada a 60° C por 72 horas y finalmente se colocaron las muestras en bolsas de papel a temperatura controlada. Posteriormente a estos pasos las raíces obtenidas fueron medidas mediante el método computacional WINRhizo.



FOTO 2 Distribución de raíces en cama de clavos.

Para la evaluación matemática de los distintos datos obtenidos se utilizó; el programa Excel de Microsoft Corporación. La evaluación estadística de la longitud radical se llevo a cabo con el programa computacional STATGRAPHIC 4.0 PLUS. Y los análisis de regresión con Graphpad Prisma 4.0

3.5 Medición de la densidad de longitud radical.

La medición de la longitud radical se realizó a través del programa computacional WINRhizo versión 2003b, el cual fue previamente calibrado con respecto al método de las intersecciones (TORO, 1979).

3.5.1 Calibración de WINRhizo. Para la calibración del programa computacional de análisis de imágenes WINRhizo , se utilizó la versión 2003b de este programa con el cual se evaluaron hilos de coser negro de 0,05 mm de diámetro, los cuales tenían una longitud total de 300 cm seccionados en trozos de 10 cm, los cuales fueron colocados uno por uno (en forma acumulativa) sobre la superficie del scanner óptico Epson Perfection 1250, para ser escaneados utilizando la máxima superficie de barrido (21.6 x 27.9 cm (602.64 cm²) que permite este modelo. Posteriormente los hilos fueron medidos a distintas resoluciones del escáner óptico las cuales correspondieron a 100, 200, 300 y 400 dpi, (dots per inch) con el fin de obtener la resolución que mejor se ajustara a las longitudes reales de los hilos evaluados, para encontrar las diferencias presuntas entre ellas fueron analizadas mediante un Andeva ($p > 0,05$).

Una vez evaluada la resolución que mejor se ajusto a las longitudes de los hilos se procedió a contrastar WINRhizo 2003b versus el método de las intersecciones desarrollado por NEWMAN (1966) también llamado el método de Tennant, utilizando raíces de ballicas, con el fin de buscar la correlación de estos dos métodos.

En el método de las intersecciones las raíces fueron puestas en una bandeja vidrio transparente con una superficie de 40x30 cm (120 cm^2) y 3 cm de altura en la cual se introdujo una hoja de papel milimetrado del cual se consideró las cuadrículas de 1 cm^2 para efectuar las mediciones, posteriormente a este paso se agregó agua a la bandeja hasta el nivel de 1 cm, con el fin de que las raíces introducidas en ésta, flotaran y se distribuyeran al azar sobre el papel milimetrado. Una vez que las raíces se encontraban distribuidas, y asentadas sobre el papel, se procedió a contabilizar el número de intersecciones con un contador de colonias manual. Estos resultados fueron registrados para luego ser estudiados y así obtener el largo de las raíces analizadas.

Por otra parte las raíces evaluadas mediante WINRhizo, se midieron con los mismos pasos utilizados en la calibración con los hilos de coser, mediante sólo la resolución de 100 dpi. Los resultados obtenidos mediante estas dos metodologías fueron contrastados mediante un análisis de regresión lineal para ver la correlación existente entre los datos obtenidos con WINRhizo y el método de las intersecciones. El PC que se utilizó en el trabajo con WINRhizo constaba con un procesador Celeron de 766 Mhz, 64 Mb de Ram, además se utilizaron, una bandeja de polietileno, para la separación de las raíces y así no perder material de estudio, bolsas de papel para el secado y conservación del material y pinzas.

4 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Biomasa aérea

Para la evaluación de la respuesta a la fertilización fosforada sobre el rendimiento de la biomasa aérea, se realizó un análisis de regresión en el cual se contrastó las diferentes dosis de P con el rendimiento total de biomasa aérea (kg MS ha⁻¹). El modelo que mejor se ajusta a los datos obtenidos correspondió al tipo Mitscherlich el cual esta expresado en la ecuación $Y = A * (1 - B * \exp(-C * X))$, los parámetros más importantes de este análisis se presentan a continuación en el Cuadro 5.

Cuadro 5 Parámetros de la evaluación de regresión entre el rendimiento de biomasa aérea total (kg MS ha⁻¹), nivel de P.

| Parámetros | Valores |
|----------------|---------|
| a | 17320 |
| b | 0,1948 |
| c | 0,01392 |
| Syx | 1489 |
| R ² | 0,4705 |

Al determinar el coeficiente de correlación (R²) del modelo utilizado, se obtuvo que este alcanzó el valor de 0,4705, lo cual indica que el modelo se ajusta en un 47% a lo observado. Por su parte el rendimiento máximo teórico representado en el parámetro “a” del Cuadro 5, alcanzó un valor de 17320 Kg MS ha⁻¹ de biomas aérea total, el cual no se alcanzó en el ensayo. Por otra parte la pendiente de la curva obtenida mediante el análisis, indicó que alrededor del 80% del rendimiento máximo esperable equivalente a 13946 kg MS ha⁻¹ se obtiene con el nivel inicial de P-Olsen en el suelo sin la aplicación de fertilizante.

El coeficiente de curvatura representado en el parámetro “c” del Cuadro 3 muestra que por la adición de una unidad P, el incremento en la producción de biomasa aérea (kg MS ha^{-1}) alcanzaría un valor aproximado de 1,3%, hasta alcanzar el nivel máximo bajo las condiciones del ensayo.

4.2 Biomasa radical

En el análisis de este parámetro se realizó un análisis de andeva ($P < 0,05$), para contrastar los promedios de los distintos tratamientos y así evaluar las diferencias significativas a través del test de Tukey HSD (95%) como se muestra en el Cuadro 5.

CUADRO 6 Producción de Biomasa Radical (kg MS ha^{-1}) por tratamientos, para las distintas fechas de corte.

| Fecha de corte | Dosis de fósforo aplicado ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) | | | |
|----------------|---|--------------|---------------|--------------|
| | 0 | 55 | 110 | 220 |
| 28 nov | 1585 ± 150 a | 1499 ± 146 a | 1864 ± 191 a | 1737 ± 253 a |
| 19 dic | 1272 ± 107 a | 1459 ± 172 a | 1635 ± 174 ab | 1934 ± 157 b |
| 13 ene | 1579 ± 563 a | 1430 ± 155 a | 1724 ± 188 a | 1739 ± 198 a |
| 27 ago | 1167 ± 159 a | 1399 ± 116ab | 1756 ± 279 b | 1706 ± 48 b |
| 28 oct | 1710 ± 176 a | 1489 ± 31 a | 1767 ± 79 a | 1723 ± 170 a |

4.2.1 Producción de biomasa radical. Al comparar la producción de biomasa aérea (kg MS ha⁻¹, Cuadro 1) con la producción de biomasa radical (kg MS ha⁻¹, Cuadro 6) se determinó que la producción de la parte aérea, en general, es mayor que la producción de raíces. La proporción en producción de biomasa aérea con respecto a la biomasa radical cambia desde valores de 1.1 hasta 1.6 veces entre el primer y tercer corte, en tanto que en los dos últimos cortes los valores de esta razón aumentaron a 2.2 y 3.0 veces, respectivamente (Cuadro 7). Se observó además, que la razón no presenta un patrón específico con la dosis de P en cada una de las épocas de corte.

CUADRO 7 Razón biomasa aérea/ biomasa radical por tratamientos (kg P₂O₅ ha⁻¹) para las distintas fechas de muestreo.

| Fecha | Dosis de fósforo aplicado (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹) | | | |
|---------------|--|-------|-------|-------|
| | 0 | 55 | 110 | 220 |
| 28 nov | 0,840 | 1,248 | 1,026 | 1,341 |
| 19 dic | 1,336 | 1,235 | 1,205 | 1,113 |
| 13 ene | 1,592 | 1,815 | 1,586 | 1,630 |
| 27 ago | 2,824 | 2,516 | 1,859 | 1,700 |
| 28 oct | 2,371 | 3,411 | 3,105 | 3,270 |

La producción total de biomasa (aérea más radical), en general, aumentó al aumentar la dosis de fósforo, a pesar de esto ambas biombras presentaron tendencias de crecimiento distintas en el tiempo. Al analizar el efecto de la dosis de fósforo sobre la producción de biomasa, se determinó que la producción de biomasa aérea y la biomasa radical presentaron diferencias estadísticas significativas, en épocas diferentes de corte realizados. La biomasa aérea presentó diferencias estadísticas en los cortes realizados el 28 de noviembre y 28 de octubre. Por su parte, la biomasa radical presentó

diferencias estadísticas en las fechas de corte del 19 de diciembre y 27 de agosto.

La tasa de crecimiento ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$) de la biomasa aérea presentó valores máximos durante los meses de noviembre a enero (Cuadro 8). Sin embargo, la razón de biomasa aérea a biomasa radical se incrementó entre enero a octubre, haciendo suponer que la biomasa radical se mantiene relativamente constante, una vez alcanzado un valor máximo, por sobre el cual se incrementa la parte aérea.

Ello podría explicar la diferencia en épocas de crecimiento de la parte aérea y de la parte radical. El crecimiento estadísticamente significativo con respecto a la dosis de P observado en el corte de octubre se produciría después de que se ha producido el crecimiento radical

CUADRO 8 Tasa de crecimiento ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$) de la biomasa aérea por tratamientos.

| Fechas | Dosis de fósforo aplicado ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) | | | |
|---------------|---|-------|-------|-------|
| | 0 | 55 | 110 | 220 |
| 28 nov | 16,4 | 23,1 | 23,6 | 28,8 |
| 19 dic | 80,9 | 85,8 | 93,8 | 102,5 |
| 13 ene | 100,6 | 103,8 | 109,4 | 113,4 |
| 27 ago | 35,1 | 37,4 | 34,7 | 30,9 |
| 28 oct | 25,0 | 31,4 | 33,9 | 34,8 |

Los resultados anteriores se explicarían en lo planteado por Jones, 1992, citado por PEILING *et al.* (1999), señalando que el crecimiento de la parte aérea

y el crecimiento radical presentan dependencia mutua, aunque presentan relaciones competitivas por agua, nutrientes y sustancias fotosintéticas, además cambios en las condiciones ambientales pueden romper este equilibrio, cambiando el sentido del desarrollo, vale decir favorecido el crecimiento radical con una disminución del crecimiento de la parte aérea y viceversa. Variaciones en la relación en el crecimiento de la parte aérea y radical son observadas cuando se produce un estrés de carbohidratos.

El Cuadro 6 muestra la producción de biomasa radical a través de las distintas fechas. El análisis estadístico mostró diferencias significativas en los muestreos de diciembre y agosto. En diciembre se diferenció el tratamiento de la dosis máxima ($220 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) con respecto del nivel deficiente y la dosis subóptima (0 y $55 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente). El tratamiento de $220 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ produjo alrededor de un 42% más de biomasa radical que los tratamientos subóptimos (Cuadro 6). Por su parte, en agosto, se diferenciaron los tratamientos óptimos y supraóptimo del tratamiento control sin aplicación de P. La producción de biomasa radical en el tratamiento deficiente fue de un 66 % menor respecto con el tratamiento óptimo ($110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$), el cual presentó la mayor biomasa radical (kg MS ha^{-1}) para esta fecha de muestreo.

Al analizar la distribución de la biomasa radical en la profundidad del suelo, separados en estratas de 10 cm en las dos fechas de corte con diferencias estadísticas significativas (Cuadro 9), se determinó un patrón de distribución de biomasa diferente, en donde se producen las diferencias estadísticas con respecto a la dosis de P aplicada. El muestreo de agosto produjo una mayor cantidad de biomasa radical, en los primeros 20 cm de suelo, en todos los tratamientos, alcanzando alrededor de 1.2 veces más que el muestreo del 19 de diciembre. En cambio en la profundidad que va desde los 30 cm hasta > 70 cm, la producción de biomasa radical (kg MS ha^{-1}) fue mayor en el muestreo de diciembre.

Cuadro 9 Variación de la Biomasa Radical (kg MS ha⁻¹) cada 10 cm de profundidad por tratamientos.

| 19 de Diciembre 2002 | | | | |
|-----------------------------|--|-----------|------------|------------|
| Profundidad (cm) | Dosis de fósforo (Kg P₂ O₅) | | | |
| | 0 | 55 | 110 | 220 |
| 0-10 | 585a | 709ab | 844b | 880b |
| 10-20 | 141a | 172a | 146a | 218b |
| 20-30 | 98a | 112a | 117ab | 154b |
| 30-40 | 92a | 93a | 103a | 109a |
| 40-50 | 75a | 74a | 72a | 105a |
| 50-60 | 52a | 57a | 63a | 85b |
| 60-70 | 45a | 53a | 51a | 69b |
| >70 | 180a | 187a | 239b | 196ab |
| 27 de agosto 2003 | | | | |
| Profundidad (cm) | Dosis de fósforo (Kg P₂ O₅) | | | |
| | 0 | 55 | 110 | 220 |
| 0-10 | 713a | 753a | 962b | 1012b |
| 10-20 | 200a | 265ab | 352b | 291b |
| 20-30 | 86a | 129b | 145b | 117ab |
| 30-40 | 59a | 68ab | 95b | 89b |
| 40-50 | 30a | 52b | 54b | 53b |
| 50-60 | 20a | 34a | 39a | 36a |
| 60-70 | 14a | 26a | 24a | 23a |
| >70 | 44a | 73ab | 86b | 86b |

Para analizar más en detalle el comportamiento del desarrollo de la biomasa radical de las dos fechas que presentaron diferencias estadísticas significativas, se realizó un análisis de regresión evaluando la relación entre la dosis de fertilizante y el rendimiento de biomasa radical kg MS ha^{-1} .

CUADRO 10 Parámetros de regresión para las dos fechas que presentaron diferencias significativas entre tratamientos.

| Fecha | Parámetro | Valor |
|---------------------|----------------|---------|
| 19 diciembre | a | 1136 |
| | b | 7,51 |
| | c | -0,0221 |
| | R ² | 0,705 |
| | Syx | 174,1 |
| 27 agosto | a | 1207 |
| | b | 2,989 |
| | R ² | 0,786 |
| | Syx | 139,3 |

El análisis de regresión mostró modelos distintos para ambas fechas. Para agosto el modelo que mejor se ajustó a los datos obtenidos correspondió al modelo lineal ($y = a + bx$) con un R² de 0,78, lo que equivale a un 78% de ajuste del modelo, en cambio, para diciembre el modelo que mejor se ajustó a los datos obtenidos correspondió al tipo cuadrático, ($y = a + bX + cx^2$) con R² de 0,7 (Cuadro 10) lo que equivale a un 70% de ajuste. Lo anterior indica que en agosto la biomasa radical (kg MS ha^{-1}) presentó una respuesta positiva y sin restricciones al incremento en la dosis de P. En esta fecha la planta no presenta como limitante en el contenido de agua en el suelo, por lo cual es capaz de absorber prácticamente todo el P que se encuentre disponible, aumentando la biomasa radical en directa relación al contenido de P, concentrando las raíces en el lugar de aplicación del fertilizante (20 cm de

profundidad). No así para el caso de diciembre, en donde el modelo demostró que existe un aumento en la producción de biomasa radical al aumentar la dosis de P, llegando a un punto máximo que concuerda con la dosis óptima (110 kg P_2O_5), para luego disminuir en el tratamiento de la dosis supraóptima (220 kg P_2O_5), esto podría estar asociado a que en diciembre se produjo un déficit hídrico, el que provocaría un aumento de la biomasa radical en profundidad como efecto compensatorio para maximizar la absorción de agua disminuyendo el crecimiento en superficie, además de generar un efecto inhibitorio el aumento de la concentración pasada la dosis óptima. O bien que la planta no es capaz de absorber mayores cantidades de P ya que el agua disponible en el suelo es utilizada para otras funciones fisiológicas.

Si se piensa que ambas fechas correspondió a periodos de condiciones climáticas distintas, sobre todo en el contenido de humedad del suelo, no es extraño encontrar esta diferencia de distribución de las raíces.

Al analizar ambas fechas en estratas de 10 cm se determinó que el 19 de diciembre existieron diferencias estadísticas significativas (Tukey 95%) en la estrata de 0-10 cm entre el tratamiento control (0 kg P_2O_5 ha⁻¹) y los tratamientos de 110 y 220 kg P_2O_5 ha⁻¹, presentando el valor mas alto de biomasa radical (kg MS ha⁻¹) el tratamiento de 220 kg P_2O_5 ha⁻¹ (Cuadro 9). En la estrata de 10-20 cm sólo el tratamiento de 220 kg P_2O_5 ha⁻¹ presentó diferencia estadística significativa en relación a los demás tratamientos, mostrando esta dosis la mayor producción de biomasa radical (kg MS ha⁻¹) (Cuadro 9). La estrata de 20-30 cm también presentó diferencias estadísticas significativas, entre los tratamientos de 0 y 55 kg P_2O_5 ha⁻¹ con los de 110 y 220 kg P_2O_5 ha⁻¹ siendo este ultimo el que mostró la mayor producción de biomasa radical (kg MS ha⁻¹). En los siguientes estratas de 30-40 cm y 40-50 cm no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. A diferencia de lo anterior en los estratas de 50-60 cm y 60-70

sólo presentó diferencia el tratamiento de 220 kg P_2O_5 ha^{-1} con respecto a los demás tratamientos, siendo este el que alcanzó en ambos casos la mayor biomasa radical (kg MS ha^{-1}). Sobre los 70 cm de profundidad se muestra en el Cuadro 9 que los tratamientos de 0 y 55 kg P_2O_5 ha^{-1} se diferenciaron estadísticamente de los tratamientos de 110 y 220 kg P_2O_5 ha^{-1} alcanzando la mayor biomasa radical (kg MS ha^{-1}) estos dos últimos tratamientos.

Por otra parte el muestreo de raíces del 27 de agosto (Cuadro 9) al ser evaluado en estratas de 10 cm presentó diferencias estadísticas entre los distintos tratamientos al ser evaluados con Tukey (95%) como se describe a continuación.

En la estrata de 0-10 cm los tratamientos de 0 y 55 kg P_2O_5 ha^{-1} presentaron diferencias estadísticas en relación a los tratamientos de 110 y 220 kg P_2O_5 ha^{-1} obteniéndose la mayor biomasa radical (kg MS ha^{-1}) el tratamiento de 220 kg P_2O_5 ha^{-1} (Cuadro 9). Por otra parte la estrata de 10-20 cm sólo el tratamiento control (0 kg P_2O_5 ha^{-1}) presentó diferencia estadísticamente significativa al ser comparado con los otros tres tratamientos, presentando la mayor biomasa radical (kg MS ha^{-1}) el tratamiento de 110 kg P_2O_5 ha^{-1} . En la estrata de 20-30 cm de profundidad el tratamiento control (0 kg P_2O_5 ha^{-1}) presentó diferencias estadísticamente significativas con los tratamientos de 55 y 110 kg P_2O_5 ha^{-1} , en cambio el tratamiento de dosis supraóptima (220 kg P_2O_5 ha^{-1}) no presentó diferencias significativas con los otros tres tratamientos. El tratamiento que produjo mayor biomasa radical (kg MS ha^{-1}) fue el tratamiento de 110 kg P_2O_5 ha^{-1} para esta profundidad. La estrata de 30-40 cm presentó una tendencia similar en el cual el tratamiento de 0 kg P_2O_5 ha^{-1} presentó diferencias significativas con los tratamientos de 110 y 220 kg P_2O_5 ha^{-1} en cambio el tratamiento de 55 kg P_2O_5 ha^{-1} no presentó diferencias estadísticas con ningún tratamiento, además, la mayor biomasa radical (kg MS ha^{-1}) la presentó el tratamiento de 110 kg P_2O_5 ha^{-1} . En la estrata de 40-50 cm

sólo el tratamiento control fue estadísticamente diferente en comparación con los otros tres tratamientos siendo este el que alcanzó la menor biomasa radical (30 kg MS ha^{-1}), siendo la contraparte el tratamiento de $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$. Para las estratas de 50-60 y 60-70 cm de profundidad no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento. Para la última estrata evaluada que correspondió a $> 70 \text{ cm}$ de profundidad se muestra en el Cuadro 9 que el tratamiento control ($0 \text{ P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) presentó diferencias significativas con los tratamientos de 110 y $220 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ presentando la mayor producción de biomasa radical (kg MS ha^{-1}) los tratamiento de 110 y $220 \text{ P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$.

4.2.2 Distribución porcentual de raíces. La distribución porcentual de raíces en estratas de 10 cm (Cuadro 11) muestra que cerca del 50 % de las raíces se encuentra en los primeros 10 cm y que la contribución de la estrata de 10-20 cm correspondió a valores entre 11 y 18% del total de raíces. Sin embargo estos porcentajes presentes en la estrata 10-20 cm son altos y cuantitativamente similares a los encontrados en el estrata de 0-10 cm de algunos cultivos lo que implica que la extracción de agua y nutrientes en este estrata es muy significativa para el cultivo.

Al estudiar en detalle la distribución porcentual de cada una de las fechas de muestreo, se determinó que en 4 fechas de las 5 fechas de muestreo, la distribución porcentual de raíces desde los 20 cm hasta $> 70 \text{ cm}$ alcanzó valores cercanos al 40 %. La excepción fue el muestreo del 27 de agosto en el cual la distribución porcentual, sólo fue de 24 %. Concentrando la mayor proporción en la estrata de 0 a 10 cm de profundidad.

Por otro lado al determinar la cantidad de raíces en lo primeros 20 cm de suelo se pudo ver que aquí se concentra alrededor del 60% del total. Esto ocurrió en prácticamente todas las fechas de muestreo siendo la excepción el

27 de agosto en donde la contribución de las raíces en los primeros 20 cm sobrepaso el 75%.

Cuadro 11 Distribución porcentual de la biomasa radical de ballicas bianuales por fecha de muestreo cada 10 cm de profundidad.

| Distribución porcentual de raíces (%) | | | | | |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Profundidad (cm) | 28 nov | 19 dic | 13 ene | 27 ago | 28 oct |
| 0-10 | 47.9 | 48.1 | 47.1 | 57.3 | 48.7 |
| 10-20 | 12.1 | 10,9 | 12.0 | 18.4 | 14.6 |
| 20-30 | 8.0 | 7.7 | 10,0 | 7.9 | 9.8 |
| 30-40 | 6.9 | 6.4 | 7.6 | 5.1 | 8.2 |
| 40-50 | 6.4 | 5.2 | 5.8 | 3.1 | 6.0 |
| 50-60 | 4.7 | 4.1 | 4.0 | 2.1 | 3.7 |
| 60-70 | 3.6 | 3.5 | 3.0 | 1.4 | 2.5 |
| >70 | 10,5 | 14.2 | 10,5 | 4.7 | 6.5 |

4.3 Resultados de la calibración de WINRhizo.

Para la calibración de WINRhizo se realizó un análisis de regresión entre los valores obtenidos mediante el método computacional a distintas resoluciones y la longitud real de hilos de cocer.

El modelo de regresión que mejor se ajustó a todos los casos fue el de tipo lineal, con un R^2 cercano al 99% (Cuadro 12). Los demás parámetros del análisis de regresión al igual que en el del R^2 fueron similares.

En el caso de las pendientes se obtuvo que todas presentaron valores cercanos a 1 lo cual indica que la tendencia de la relación entre las longitudes es lineal. Por otra parte el error estándar de todas las resoluciones fue cercano a 3.5 .

Es por esto que para la medición de las raíces se utilizó la resolución de 100 dpi (“dots per inch”), ya que el tiempo de análisis se incrementó el doble cada vez que se aumentó la resolución.

Cuadro 12 Resultado de la comparación de hilos de medidas conocidas con los valores obtenidos a distintas resoluciones por el programa WINRhizo 2003b.

| Resolución (dpi) | Parámetros comparativos | | |
|------------------|-------------------------|----------------|-----|
| | B | R ² | Syx |
| 100 | 1,002 | 0,9985 | 3,2 |
| 200 | 1,017 | 0,9856 | 3,6 |
| 300 | 1,016 | 0,9957 | 3,9 |
| 400 | 1,009 | 0,9999 | 3,7 |

Una vez obtenida la resolución para efectuar las mediciones de las raíces de ballica, se procedió a medir estas mediante WINRhizo y el método de las intersecciones, con el objetivo de encontrar la relación de ambas metodologías.

En la figura N° 2 se muestra la grafica del análisis de regresión entre lo valores obtenidos con el método de las intersecciones y WINRhizo 2003b, con lo cual se obtuvo que el coeficiente de correlación fue de un 98% ($R^2=0,98$) entre ambos métodos, lo cual es un porcentaje que no representa una diferencia significativa entre ellos, lo cual quiere decir que ambos métodos son correlacionables entre si.

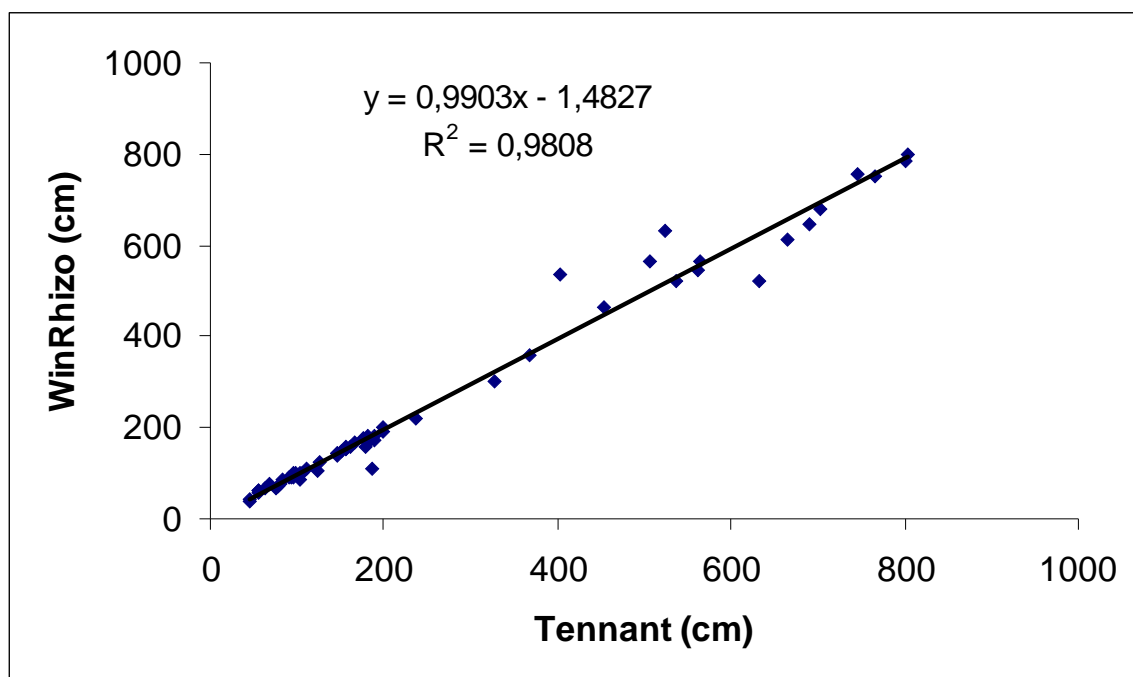


Figura 2 Valores de longitud radical de ballica utilizando ambas metodologías de medición.

Los valores obtenidos por WINRhizo fueron el la mayoría de los casos son mayores que los obtenidos por el método de las intersecciones, lo cual se asemeja a los observado por BOUMA (2000) el cual plantea que esto se debe principalmente al error asociado al factor humano, del método de las intersecciones, ya que este aumenta su dificultad a medida que el diámetro de las raíces se hace más pequeño (BÖHM, 1979), exigiendo de la persona que realiza el conteo una gran concentración y buena vista. Otro factor de variación de los resultados está asociado a que las raíces demasiado finas no son medidas por WINRhizo debido a que estas no presentan contraste debido a su color, lo cual no permite que sean analizadas por el programa.

4.4 Medición de la densidad radical (L_V) de las raíces de ballica bianual.

Los valores de densidad radical obtenidas con los tratamientos de distintos niveles de fertilidad fosforada se compararon a través de un andeva ($P < 0,05$), contrastando los promedios de los tratamientos a través del test de Tukey HSD (95%). Además, en la evaluación de L_V (cm cm^{-3}) se consideraron todas las fechas de extracción de raíces con sus respectivos tratamientos considerando estratas de suelo de 5 cm. Al calcular la densidad radical promedio en la estrata de 0-20 cm suelo en todas las fechas de corte se determinó que esta alcanzó valores que van desde los 3,85 a 6,61 cm cm^{-3} , encontrándose los valores más altos al sinal del estudio. Lo anterior concuerda a lo planteado por Gonzalez-Dugo y Durand (2005), al estudiar la densidad radical en una ballica italiana (*Lolium multiflorum*), creciendo bajo distintas condiciones de humedad, en lo cual determinaron una densidad radical promedio en los 20 cm de suelo de 6 cm cm^{-3} .

4.4.1 Muestreo 28 de Noviembre 2002. Este muestreo correspondió al día 112 después del establecimiento del cultivo. En este muestreo todas las repeticiones de los tratamientos alcanzaron una profundidad de enraizamiento de 125 cm. En general, se observaron pocas diferencias significativas debidas a los tratamientos de niveles de fertilidad fosforada sobre la densidad radical. Sin embargo, cuando estas se produjeron se ordenaron en función de la dosis de P aplicada. Por otro lado la L_V en los primeros 20 cm alcanzó un valor de 5,64 cm cm^{-3} .

Al analizar el efecto de los tratamientos en las mediciones de densidad radical en las estratas de 5 cm de profundidad no se determinaron diferencias estadísticas en los estratas que van desde los 0 a los 40 cm de profundidad. Además, entre la profundidad de 40 cm a 125 cm (17 estratas analizadas) solo dos presentaron diferencias significativas.

CUADRO 13 Variación de la densidad radical L_v (cm cm^{-3}) en profundidad para distintas dosis de fertilización fosforada.

| Profundidad | Dosis de fósforo ($\text{Kg P}_2\text{O}_5$) | | | |
|----------------|--|--------|--------|--------|
| | 0 | 55 | 110 | 220 |
| 0-5 | 11,96a | 12,63a | 15,62a | 13,60a |
| 5-10 | 4,75a | 3,48a | 5,63a | 4,39a |
| 10-15 | 2,36a | 2,52a | 2,64a | 2,54a |
| 15-20 | 1,76a | 1,94a | 2,39a | 2,09a |
| 20-25 | 1,90a | 2,01a | 1,81a | 1,88a |
| 25-30 | 1,65a | 1,78a | 1,97a | 1,26a |
| 30-35 | 1,29a | 1,42a | 1,72a | 1,59a |
| 35-40 | 1,25a | 1,21a | 1,72a | 1,57a |
| 40-45 | 0,86a | 1,03ab | 1,47b | 1,25ab |
| 45-50 | 0,87a | 0,85a | 1,18a | 1,16a |
| 50-55 | 0,63a | 0,71a | 1,01a | 0,88a |
| 55-60 | 0,52a | 0,66a | 0,82a | 0,82a |
| 60-65 | 0,47a | 0,56a | 0,98a | 0,70a |
| 65-70 | 0,39a | 0,50ab | 0,77b | 0,58ab |
| 70-75 | 0,36a | 0,40a | 0,66a | 0,52a |
| 75-80 | 0,33a | 0,41a | 0,59a | 0,46a |
| 80-85 | 0,30a | 0,30a | 0,54a | 0,35a |
| 85-90 | 0,28a | 0,32a | 0,46a | 0,31a |
| 90-95 | 0,27a | 0,31a | 0,37a | 0,29a |
| 95-100 | 0,27a | 0,28a | 0,37a | 0,28a |
| 100-105 | 0,31a | 0,27a | 0,35a | 0,25a |
| 105-110 | 0,23a | 0,26a | 0,31a | 0,25a |
| 110-115 | 0,23a | 0,23a | 0,30a | 0,19a |
| 115-120 | 0,22a | 0,22a | 0,29a | 0,21a |
| 120-125 | 0,21a | 0,21a | 0,28a | 0,17a |

De esta forma, en la estrata de 40-45 cm de profundidad, se determinó diferencias entre el tratamiento sin aplicación de P ($0 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) y el tratamiento con la dosis óptima ($110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$), la cual obtuvo la mayor L_v con un valor de $1,47 \text{ cm cm}^{-3}$ (Cuadro 13). Las diferencias estadísticas se presentaron en un aumento de L_v a medida que la dosis de fósforo fue mayor.

Además, en la estrata de 65-70 cm las diferencias estadísticas fueron similares a la estrata 40-45 cm, siendo estas entre el tratamiento sin aplicación ($0 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) con el tratamiento de dosis óptima ($110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) alcanzando valores de $0,39 \text{ cm cm}^{-3}$ y $0,77 \text{ cm cm}^{-3}$, respectivamente (Cuadro 13).

4.4.2 Muestreo 19 de diciembre 2002. Este muestreo que correspondió al día 133 después del establecimiento. La profundidad de enraizamiento en los tratamientos sin aplicación, óptima y supraóptima ($0, 110$ y $220 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$), alcanzaron una profundidad promedio de 118 cm, en cambio el tratamiento de dosis subóptima alcanzó los 125 cm de profundidad, mientras que L_v en los primeros 20 cm alcanzo un valor de $3,85 \text{ cm cm}^{-3}$ un 32% menor en relación a la fecha de corte anterior. En esta fecha de corte no se determinó diferencias estadísticas en densidad radical en los tratamientos al ser analizados en estratas de 5 cm (Cuadro 14). Esto fue diferente de lo observado en biomasa radical (kg MS ha^{-1}), donde en esta época se presentaron diferencias significas entre tratamientos (Cuadro 6). Esta diferencia entre el parámetro de biomasa radical y densidad radical implicó que al considerar los tratamientos que presentaron diferencias significativas (110 y $220 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, Cuadro 17) en biomasa radical presentaron los valores más altos en el parámetro “a” (intercepto) de la regresión potencial (valores de 20,1 y de 16,7, respectivamente, Cuadro 17) lo que implicaría que las raíces en estos dos tratamientos serian más engrosadas, lo que justificaría un mayor peso pero no una mayor densidad de largo radical

CUADRO 14 Variación de la densidad radical L_v ($\text{cm}^3\text{cm}^{-1}$) en profundidad para distintas dosis de fertilización fosforada.

| Profundidad | Dosis de fósforo ($\text{Kg P}_2\text{O}_5$) | | | |
|-------------|--|--------|-------|-------|
| | 0 | 55 | 110 | 220 |
| 0-5 | 8,35a | 6,81a | 8,48a | 5,75a |
| 5-10 | 4,39a | 3,66a | 4,04a | 4,99a |
| 10-15 | 2,56a | 2,42a | 2,22a | 2,38a |
| 15-20 | 1,21a | 1,35a | 1,57a | 1,43a |
| 20-25 | 1,26a | 1,38a | 1,29a | 1,93a |
| 25-30 | 0,97a | 1,24a | 1,08a | 1,55a |
| 30-35 | 1,16a | 1,20a | 1,09a | 1,64a |
| 35-40 | 1,54a | 1,18a | 1,32a | 0,99a |
| 40-45 | 1,30a | 1,26a | 1,35a | 1,27a |
| 45-50 | 1,19a | 1,26a | 1,25a | 1,23a |
| 50-55 | 1,06a | 1,01a | 1,11a | 1,12a |
| 55-60 | 0,99a | 0,79a | 0,92a | 1,08a |
| 60-65 | 0,89a | 0,70a | 0,83a | 0,75a |
| 65-70 | 0,86a | 0,58a | 0,80a | 0,80a |
| 70-75 | 0,65a | 0,60a | 0,80a | 0,87a |
| 75-80 | 0,72a | 0,49a | 0,85a | 0,79a |
| 80-85 | 0,69a | 0,47a | 0,78a | 1,46a |
| 85-90 | 1,47a | 0,37a | 0,72a | 0,65a |
| 90-95 | 0,55a | 0,37a | 0,55a | 0,37a |
| 95-100 | 0,46a | 0,28a | 0,36a | 0,35a |
| 100-105 | 0,39a | 0,22a | 0,23a | 0,33a |
| 105-110 | 0,22a | 0,18a | 0,20a | 0,28a |
| 110-115 | 0,20a | 0,18a | 0,21a | 0,25a |
| 115-120 | 0,10a | 0,14a | 0,12a | 0,10a |
| 120-125 | 0,00a | 0,067a | 0,00a | 0,00a |

Por otra parte la densidad radical en la estrata de 0-5 cm fue menor que en el muestreo del 28 de noviembre. A pesar de esto en las estratas siguientes se mantuvo prácticamente la misma distribución de la densidad en las dos fechas.

4.4.3 Muestreo 13 de enero 2003. Este muestreo correspondió a 158 días después del establecimiento del cultivo. La profundidad de enraizamiento en todos los casos alcanzó los 125 cm de profundidad. El patrón de enraizamiento en profundidad mostró que la mayor densidad radical se encuentra en los primeros 20 cm de suelo con un valor promedio de $4,24 \text{ cm cm}^{-3}$. En general se presentaron pocos tratamientos con diferencias significativas al ser analizados estadísticamente en estratas de 5 cm de profundidad, los cuales se ordenaron en función de la dosis de P aplicada.

Al analizar el efecto de los tratamientos en las mediciones de la densidad radical, se determinó que solo 3 estratas presentaron diferencias significativas en dos de las cuales fue el tratamiento con dosis óptima ($110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) el que se diferenció estadísticamente de los demás. Estos estratos correspondieron al de 0 a 5 cm y el de 90 a 95 cm con una densidad radical de $16,90 \text{ cm cm}^{-3}$ y $0,94 \text{ cm cm}^{-3}$ para cada caso.

Por su parte la otra estrata que presentó diferencias significativas correspondió a la de 75 a 80 cm en donde el tratamiento que se diferenció estadísticamente fue el tratamiento de dosis supraóptima ($220 \text{ Kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$), con una densidad radical de $0,97 \text{ cm cm}^{-3}$.

CUADRO 15 Variación de la densidad radical L_v (cm cm^{-3}) en profundidad para distintas dosis de fertilización fosforada.

| Profundidad | Dosis de fósforo ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) | | | |
|----------------|--|----------|----------|----------|
| | 0 | 55 | 110 | 220 |
| 0-5 | 9,3398a | 10,6703a | 16,9876b | 11,6077a |
| 5-10 | 3,9648a | 4,5193a | 3,5446a | 6,4873a |
| 10-15 | 2,3247a | 2,6357a | 1,9960a | 2,8904a |
| 15-20 | 1,3312a | 1,6661a | 1,7237a | 1,8361a |
| 20-25 | 1,3478a | 1,4276a | 1,5732a | 1,9701a |
| 25-30 | 1,2000a | 1,4861a | 1,4548a | 1,4073a |
| 30-35 | 1,2591a | 1,1671a | 1,4969a | 1,3011a |
| 35-40 | 1,3498a | 1,2273a | 1,4487a | 1,3433a |
| 40-45 | 1,1073a | 1,0240a | 1,0659a | 1,3627a |
| 45-50 | 1,1090a | 0,9597a | 0,9547a | 1,3733a |
| 50-55 | 0,8865a | 0,8041a | 0,9854a | 1,2381a |
| 55-60 | 0,7189a | 0,8279a | 0,8983a | 1,1217a |
| 60-65 | 0,6312a | 0,7863a | 0,7597a | 0,8852a |
| 65-70 | 0,6866a | 0,7343a | 0,7771a | 0,9457a |
| 70-75 | 0,6066a | 0,7224a | 0,8007a | 0,9781a |
| 75-80 | 0,5514a | 0,6169ab | 0,8066ab | 1,0526b |
| 80-85 | 0,5757a | 0,7269a | 0,7892a | 0,7668a |
| 85-90 | 0,6500a | 0,5239a | 0,8267a | 0,8072a |
| 90-95 | 0,7399a | 0,491ab | 0,9499b | 0,8166ab |
| 95-100 | 0,4990a | 0,5580a | 0,7236a | 0,7739a |
| 100-105 | 0,4583a | 0,5548a | 0,6849a | 0,7507a |
| 105-110 | 0,4130a | 0,5431a | 0,5650a | 0,6887a |
| 110-115 | 0,2455a | 0,3926a | 0,4672a | 0,7076a |
| 115-120 | 0,2052a | 0,4661a | 0,1002a | 0,7595a |
| 120-125 | 0,1142a | 0,2493a | 0,3561a | 0,5665a |

4.4.4 Muestreo 27 de agosto 2003. Esta fecha de muestreo que correspondió a 384 días después del establecimiento. Para esta fecha de muestreo la profundidad de enraizamiento alcanzó en todos tratamientos los 125 cm de profundidad. La densidad radical promedio en los primeros 20 cm fue de 4,86 cm cm^{-2} .

Al igual que en los casos anteriores, se observaron pocas diferencias significativas debidas a los tratamientos de niveles de fertilidad fosforada sobre la densidad radical. Sin embargo, cuando estas se produjeron se ordenaron en función de la dosis de P aplicada.

El andeva ($p < 0,05$) realizado al efecto en la densidad radical de los tratamientos con distintas dosis de P en estratas de 5 cm, determinó que en la profundidad que va desde los 0 a los 45 cm (8 estratas analizadas), no existieron diferencias significativas con respecto a la dosis de P sobre la densidad radical (cm cm^{-3}). Además en la estrata que va desde los 45 a los 125 cm (16 estratas analizadas), solo 2 presentaron diferencias significativas (Cuadro 14). Por consiguiente en la estrata que va desde los 45 a los 50 cm se determinó diferencias estadísticas entre el tratamiento sin aplicación ($0 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) de P y el de dosis óptima ($110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) y los demás tratamientos presentando la mayor densidad radical este ultimo, con un valor de $0,9 \text{ cm cm}^{-3}$. Además en la estrata que va desde los 120 a los 125 cm las diferencias estadísticas encontradas fue entre en el tratamiento de dosis óptima ($110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) con el tratamiento de dosis supraóptima ($220 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$), encontrándose la mayor densidad radical en este ultimo con un valor de $0,17 \text{ cm cm}^{-3}$).

CUADRO 16 Variación de la densidad radical L_v (cm cm^{-3}) para distintas dosis de fertilización fosforada.

| Profundidad | Dosis de fósforo ($\text{kg P}_2\text{O}_5$) | | | |
|-------------|--|--------|-------|-------|
| | 0 | 55 | 110 | 220 |
| 0-5 | 9,08a | 8,36a | 7,93a | 7,84a |
| 5-10 | 6,22a | 4,81a | 5,83a | 5,13a |
| 10-15 | 3,78a | 3,44a | 3,87a | 3,58a |
| 15-20 | 1,72a | 2,15a | 2,43a | 1,53a |
| 20-25 | 1,37a | 1,39a | 1,58a | 1,37a |
| 25-30 | 1,10a | 1,18a | 1,23a | 1,10a |
| 30-35 | 0,97a | 0,97a | 1,15a | 0,97a |
| 35-40 | 1,01a | 0,88a | 1,09a | 1,01a |
| 40-45 | 0,96a | 0,91a | 1,05a | 0,96a |
| 45-50 | 0,86a | 0,77ab | 0,90b | 0,86a |
| 50-55 | 0,79a | 0,68a | 0,76a | 0,79a |
| 55-60 | 0,64a | 0,60a | 0,74a | 0,64a |
| 60-65 | 0,58a | 0,52a | 0,66a | 0,58a |
| 65-70 | 0,51a | 0,55a | 0,51a | 0,51a |
| 70-75 | 0,44a | 0,53a | 0,42a | 0,44a |
| 75-80 | 0,39a | 0,42a | 0,41a | 0,39a |
| 80-85 | 0,38a | 0,38a | 0,34a | 0,38a |
| 85-90 | 0,34a | 0,28a | 0,31a | 0,34a |
| 90-95 | 0,32a | 0,26a | 0,26a | 0,32a |
| 95-100 | 0,32a | 0,23a | 0,22a | 0,32a |
| 100-105 | 0,32a | 0,21a | 0,20a | 0,32a |
| 105-110 | 0,30a | 0,18a | 0,20a | 0,30a |
| 110-115 | 0,18a | 0,16a | 0,17a | 0,18a |
| 115-120 | 0,15a | 0,14a | 0,12a | 0,15a |
| 120-125 | 0,16ab | 0,13ab | 0,11a | 0,17b |

4.4.5 Muestreo 28 de octubre 2003. Este muestreo correspondió a los 446 días después del establecimiento del cultivo. Para esta fecha de muestreo todos los tratamientos presentaron una profundidad de enraizamiento de 125 cm. Al contrastar mediante el andeva ($p > 0,05$) el efecto de los tratamientos con distintas dosis de P sobre la densidad radical, en estratas de 5 cm se determinó que existían diferencias significativas (Cuadro 17). Al igual que en las fechas anteriores se presentaron pocas estratas con diferencias significativas entre las distintas dosis de P, sin embargo cuando estas se presentaron se ordenaron en función de la dosis de P aplicada. Para esta fecha muestreo se determinó la densidad radical mas alta de las 5 fechas corte en los primeros 20 cm de profundidad alcanzando un valor de $6,61 \text{ cm cm}^{-3}$.

En las estratas que van desde los 0 a los 15 cm (3 estratas analizadas) de profundidad no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. No así en las estratas que van desde los 20 a los 45 cm en donde se determinaron 2 estratas con diferencias significativas. De esta forma en la estrata que va desde los 15 a los 20 cm de profundidad se determinó diferencias entre el tratamiento de dosis subóptima ($55 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) y el tratamiento de dosis óptima ($110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$), la cual obtuvo la mayor densidad radical con un valor de $3,00 \text{ cm cm}^{-3}$ (Cuadro 17). Por su lado la estrata de que va desde lo 40 a los 45 cm presento diferencias significativas entre el tratamiento sin aplicación de P ($0 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) y el tratamiento de dosis óptima ($110 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$), siendo este ultimo el que presento el valor mas alto de densidad radical con $2,01 \text{ cm cm}^{-3}$ (Cuadro 17).

CUADRO 17 Variación de la densidad radical L_v (cm cm⁻³) para distintas dosis de fertilización fosforada.

| Profundidad | Tratamientos (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹) | | | |
|----------------|---|--------|--------|--------|
| | 0 | 55 | 110 | 220 |
| 0-5 | 12,49a | 12,24a | 12,76a | 13,56a |
| 5-10 | 5,96a | 5,92a | 6,25b | 7,66b |
| 10-15 | 3,01a | 2,61a | 5,11b | 4,37b |
| 15-20 | 2,09ab | 1,87a | 3,00b | 2,16ab |
| 20-25 | 1,80a | 2,14a | 2,68a | 1,86a |
| 25-30 | 1,61a | 1,72a | 2,19a | 1,66a |
| 30-35 | 1,70a | 1,53a | 1,66a | 1,38a |
| 35-40 | 1,45a | 1,90a | 2,05a | 1,58a |
| 40-45 | 1,30a | 1,51ab | 2,01b | 1,16ab |
| 45-50 | 0,99a | 1,12a | 1,56a | 1,16a |
| 50-55 | 0,83a | 0,93a | 0,98a | 0,99a |
| 55-60 | 0,67a | 0,80a | 0,72a | 0,81a |
| 60-65 | 0,60a | 0,54a | 0,54a | 0,52a |
| 65-70 | 0,47a | 0,49a | 0,65a | 0,48a |
| 70-75 | 0,43a | 0,51a | 0,43a | 0,58a |
| 75-80 | 0,35a | 0,50a | 0,36a | 0,44a |
| 80-85 | 0,33a | 0,32a | 0,35a | 0,45a |
| 85-90 | 0,26a | 0,28a | 0,33a | 0,22a |
| 90-95 | 0,32a | 0,24a | 0,26a | 0,34a |
| 95-100 | 0,29a | 0,21a | 0,19a | 0,30a |
| 100-105 | 0,23a | 0,17a | 0,19a | 0,20a |
| 105-110 | 0,18a | 0,16a | 0,12a | 0,20a |
| 110-115 | 0,18a | 0,13a | 0,19a | 0,25a |
| 115-120 | 0,22a | 0,13a | 0,14a | 0,23a |
| 120-125 | 0,20a | 0,09a | 0,10a | 0,17a |

4.5 Evaluación de la longitud radical a través del tiempo

Para la evaluación de la longitud radical L_a (km m^{-2}) en el tiempo se realizó un ANOVA ($p > 0,05$), con el cual se determinó las diferencias estadísticas entre fechas de corte y entre tratamientos con distintas dosis de P (Cuadro 18). Para el ANOVA se consideró la longitud radical total por fecha de muestreo.

4.5.1 Variación de la longitud radical el tiempo. No se determinaron diferencias significativas en la longitud radical total entre los tratamientos con distintas aplicaciones de P (Cuadro 18), para ninguna de las fechas de muestreo. Las diferencias se presentaron entre diferentes fechas de muestreo, solo para la dosis subóptima de P (Cuadro 18). Estas diferencias se presentaron entre la segunda fecha de muestreo (19-12-2002) y la última fecha de muestreo (28-10-2003) mostrando un aumento significativo desde una longitud radical total de 14,09 a 17,28 km m^{-2} para cada muestreo, respectivamente.

CUADRO 18 Variación de la longitud radical total L_a (km m^{-2}) para las distintas fechas de muestreo.

| Dosis ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) | Fechas de muestreo | | | | |
|--|--------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 28-11-2002 | 19-12-2002 | 13-01-2003 | 27-08-2003 | 28-10-2003 |
| 0 | 16,88 Aa | 16,62 Aa | 16,15 Aa | 16,43 Aa | 18,98 Aa |
| 55 | 17,28 ABa | 14,09 Aa | 17,89 ABa | 15,06 ABa | 19,02 Ba |
| 110 | 22,04 Aa | 16,11 Aa | 21,86 Aa | 16,24 Aa | 22,41 Aa |
| 220 | 21,85 Aa | 16,18 Aa | 22,21 Aa | 15,07 Aa | 21,56 Aa |

(*) Las letras minúsculas denotan diferencias estadísticas ($p > 0,05$) entre columnas y las letras mayúsculas entre filas

Estos resultados muestran que en este estudio, la longitud radical total no varió debido a cambios en los niveles de fertilidad fosforada en el suelo, sino que las variaciones determinadas corresponden a un efecto particular debido a la época de muestreo en solo la dosis subóptima de P. Ello no presenta una explicación clara en este estudio ya que las otras dosis no presentaron esta variación en forma significativa. En general, existe la tendencia a que en el muestreo de diciembre (segundo muestreo) y en el muestreo de agosto (cuarto muestreo de raíces) se presente una disminución en la longitud total de raíces, tal como se muestra en la Figura 3.

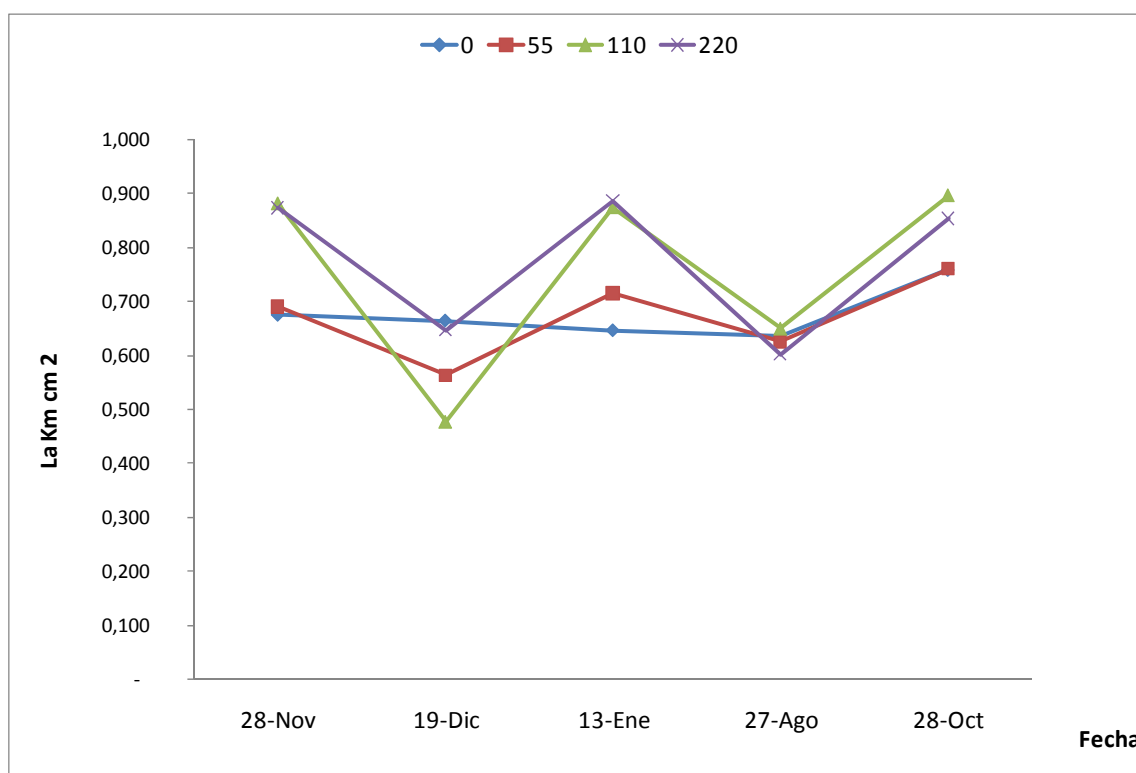


Figura 3. Variación de L_a en distintas fechas de muestreo para todos los tratamientos.

Los resultados en la Figura se pueden deber a un patrón de crecimiento estacional de las raíces, más que a variaciones presentados por tratamientos

realizados. Sin embargo, esta especulación requiere de posteriores evaluaciones

4.6 Relación entre la biomasa radical y el largo de raíces (L_a).

Es interesante evaluar si existe una relación entre la biomasa radical y la longitud de raíces, ya que midiendo la biomasa radical en peso se podría estimar la longitud radical, el cual es un parámetro más utilizado en fertilidad de suelos, que solo biomasa radical.

Se realizó un análisis de regresión en todas las fechas de muestreo considerando los tratamientos, en forma individual y en su conjunto. Además, se realizó un ajuste en los valores de intercepto del eje de las ordenadas y de las abscisas, considerando que cuando no existió peso radical (peso igual a cero), tampoco debería existir longitud radical (longitud igual a cero). De esta forma se fuerza que toda relación existente se manifieste en los dos parámetros de la ecuación, quedando mayoritariamente expresada en la pendiente (el parámetro “ b ”) la responsabilidad de expresar la relación existente. Dado que el ajuste es potencial ($y = a X^b$), el valor de “ a ” de la ecuación representa el valor de la longitud radical cuando el peso de las raíces es igual a 1 (g/m^2). Por su parte, el error estándar “ S_{yx} ” de la ecuación de regresión, representa la variación significativa con incrementos del peso radical.

En general, en todos los casos analizados se determinó una tendencia casi lineal entre la biomasa radical (gr MS m^{-2}) y L_a (cm m^{-2}), ya que los valores de pendiente en todos los casos estudiados fueron cercanos a 1, variado entre 0,90 y 1,60 (Cuadro 19). Por otra parte, se determinó que el R^2 promedio del análisis mostró un valor de 0,93, lo que indica que este modelo utilizado se ajustó alrededor de un 93% a los datos obtenidos y que solo el 7% de los resultados de la medición no pueden ser explicados por este modelo.

CUADRO 19 Parámetros de la evaluación de regresión Biomasa radical (g MS) versus L_a (km m^{-2}).

| Fecha | Parámetro | Tratamientos $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ | | | | |
|--------|----------------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 55 | 110 | 220 | Todos |
| 28 Nov | a | 8,03 | 9,87 | 6,51 | 6,39 | 6,80 |
| | b | 1,05 | 1,13 | 1,05 | 0,90 | 0,97 |
| | Syx | 0,2 | 0,17 | 0,25 | 0,24 | 0,24 |
| | R ² | 0,94 | 0,93 | 0,94 | 0,90 | 0,91 |
| 19 Dic | a | 6,67 | 7,92 | 20,1 | 17,00 | 11,78 |
| | b | 1,11 | 1,10 | 1,60 | 1,38 | 1,27 |
| | Syx | 0,13 | 0,11 | 0,24 | 0,25 | 0,28 |
| | R ² | 0,94 | 0,92 | 0,95 | 0,88 | 0,84 |
| 13 Ene | a | 8,42 | 5,84 | 5,33 | 7,72 | 5,93 |
| | b | 1,24 | 0,98 | 0,92 | 1,18 | 1,00 |
| | Syx | 0,14 | 0,13 | 0,25 | 0,27 | 0,23 |
| | R ² | 0,94 | 0,96 | 0,92 | 0,91 | 0,91 |
| 27 Ago | a | 8,53 | 11,38 | 12,81 | 14,17 | 10,74 |
| | b | 1,25 | 1,23 | 1,28 | 1,29 | 1,20 |
| | Syx | 0,17 | 0,24 | 0,24 | 0,32 | 0,30 |
| | R ² | 0,96 | 0,91 | 0,95 | 0,91 | 0,90 |
| 28 Oct | a | 6,38 | 6,28 | 6,27 | 5,87 | 6,14 |
| | b | 0,93 | 1,04 | 1,05 | 0,98 | 0,99 |
| | Syx | 0,29 | 0,11 | 0,22 | 0,11 | 0,20 |
| | R ² | 0,92 | 0,98 | 0,94 | 0,99 | 0,95 |

Otra tendencia importante fue que en la mayoría de los casos los valores del parámetro “a” alcanzaron sus valores máximos en las dosis de 110 y 220 $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ lo que nos indicaría un efecto potencial de la dosis de P sobre el diámetro de las raíces, lo cual no fue evaluado en este estudio.

Adicionalmente, estos resultados ratifican la utilidad de la determinación a través de imágenes del largo radical a través de WINRhizo 2003 b, ya que los resultados obtenidos con este método se ajustan de buena manera a los obtenidos al medir la biomasa radical en la mayoría de los tratamientos. Esto facilita en forma práctica las mediciones de longitud radical.

5 CONCLUSIONES

De este estudio se concluye que:

Los niveles de fertilidad fosforada del suelo afectan en menor medida el crecimiento de las raíces tanto en la producción de biomasa radical como en longitud radical, tanto en niveles de fertilidad fosforada deficiente, subóptima, óptima y supraóptima.

Los efectos en producción de biomasa radical se ordenan en relación a los niveles de fertilidad fosforada producidos en el suelo y fue en épocas diferentes al efecto descrito sobre la biomasa aérea, determinada previamente en el mismo experimento.

En general se determinó un efecto estacional en el crecimiento de las raíces, siendo el crecimiento menor en diciembre y que en las épocas de respuesta a fosforo las raíces son más engrosadas pero no más largas.

La relación entre la biomasa radical y la longitud radical se describe en una función potencial, lo cual implica una relación directa entre el largo radical y la biomasa radical.

6 RESUMEN

Las raíces de las plantas son el órgano especializado en la absorción de agua y nutrientes desde la solución de suelo. A pesar de esto, pocos estudios han realizado para cuantificar el crecimiento de estas bajo distintas condiciones nutricionales en los suelos de origen volcánico del sur de Chile. Este estudio tuvo como objetivo evaluar y cuantificar los parámetros de densidad radical de una ballica bianual creciendo bajo distintos niveles de fertilidad fosforada. La evaluación se realizó contrastando la relación biomasa aérea/ biomasa radical (kg MS ha^{-1}), y estudiando la profundidad de enraizamiento (cm) con distintas dosis de fósforo. La producción y distribución de raíces se midió 6 fechas para el caso de la parte aérea y en 5 para las raíces. Las raíces fueron colectadas mediante el método de cama de clavos (monolito) separada en cuadrillas de 5 cm. El material colectado fue lavado y secado en un horno de ventilación forzada a 60° C. por otra parte la densidad de longitud radical fue medida utilizando el programa computacional WINRhizo 2003b. Este estudio concluye que los niveles de fertilidad fosforada del suelo afectan en menor medida el crecimiento de las raíces tanto en la producción de biomasa radical como en longitud radical, tanto en niveles de fertilidad fosforada deficiente, subóptima, óptima y supraóptima. Los efectos en producción de biomasa radical se ordenan en relación a los niveles de fertilidad fosforada producidos en el suelo y fue en épocas diferentes al efecto descrito sobre la biomasa aérea. En general se determinó un efecto estacional en el crecimiento de las raíces y que la relación entre la biomasa radical y la longitud radical se describe en una función potencial, lo cual implica una relación directa entre el largo radical y la biomasa radical.

SUMMARY

Plant's roots are a specialized organ responsible of water and nutrient absorption from the soil solution. However, only few studies have been carried out in order to evaluate their growth under different nutrients levels in the South of Chile volcanic soil. The aim of this study was to quantify root density in biannual ryegrass growing in different phosphorous fertility levels. The evaluation was conducted contrasting aerial biomass/root biomass ratio (kg MS ha⁻¹), and investigating the depth of rooting (cm) with different doses of phosphorous fertility. Root production and distribution was measured 6 times for shoots and 5 times for roots. Roots were collected using bed of nails (monolith) of 5 cm of grid. Collected material was washed and then dried in a forced air oven at 60° C. Root length density was measured using WINRhizo 2003b program. The study conclude that soil phosphorous fertility levels less affect root growth even in biomass production than in root length, both in deficient, suboptimal, optimal and supraoptimal fertility levels. The effects of root biomass production are related to phosphorous fertility levels in different times that the effect describes in aerial biomass. In general, a seasonal effects is identified on root growth, and the relation between root biomass and root length in described in a potential function , that implicate a direct relation between root length and root biomass.

7 BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON, J y INGRAM, J. 1993. Tropical soil Biology an fertility a handbook of methods. C.A.B. international 2^{da} ed. 221 p.
- ACEVEDO, E. 1979. Interacciones suelo-agua-raíz en el proceso de absorción de agua por las plantas. Bol.Tec. Fac. Agron. Univ. Chile. 44: 17-25.
- BARBER, S. 1976. Simulation model for nutrient uptake from soils by growing plant root systems. Agronomy Journal 68: 961-964.
- BARROW, J. y SHAW, T. 1975 The slow reaction between soils and anions. 2 Effects of time, temperature and water contents of soil on the decrease in phosphate concentration in soil solution. Soil Science 119: 167-170,
- BESOAIN, M. 1985 Génesis y transformación de los minerales de arcilla en suelos derivados de cenizas volcánicas del centro sur de Chile. Talleres geograficos INIA, Santiago, Chile, 723 pp.
- BÖHM, W. 1979. Methods of studing root systems. Institut für pflanzenbau und pflanzenzüchtung der Universität Göttingen. 33: 188 p.
- BOUMA, T; NIELSEN, K y KOUTSTAAL, B. 2000. Sample preparation and scanning protocol for computerized analysis of root length and diameter. Plant and soil (218): 185-196.
- BRADY, N. y WEIL, R. 2000. Elements of the nature and properties of soils. New Jersey, USA. Prentice-hall 559 p.

- CARRASCO, M y OPAZO, J. 1995. Predicción de parámetros de respuesta al fósforo de las plantas en función de algunas propiedades químicas en suelos ultisoles y andisoles del sur de Chile. *Agricultura técnica, Chile*, 55(4) 245-250,
- CARRASCO, M; SADZAWKA, R; GREZ, R. y MORA, M. 2005 *Acidificación De los suelos volcánicos de Chile*. INIA La platina. Chile. .
- COSTA, C; DWYER, C; HAMEL, D; MAUMBA, D; WANG, X; NANTAIS, L; y SMITH, D. 2001. Root contrast enhancement for measurement with optical scanner based image analysis. *Canadian Journal of botany*. 79: 23-29.
- ELLIES, A. RAMIREZ, C. MAC DONALD, R. y GAYOSO, J. Estudio experimental del efecto de la compactación de suelos volcánicos sobre el crecimiento de *Lolium multiflorum* y *Trifolium pratense*. *Agricultura técnica* 52 (4) : 450-455.
- FÖHSE, D; CLASSEN, N y JUNGK, A. 1991. Phosphorus efficiency of plant II Significance of root radius, root hairs and cation – anion balance for phosphorus influx in seven plant species. *Plant and Soil* 191: 181-188.
- FULLER, H. 1984. *Botánica*. Segunda edición, México. Inter Americana. 512 p.
- GAHOONI. A, T y NIELSEN, N. 1996. Variation in acquisition of soil phosphorus among wheat and barley genotypes. *Plant and Soil*. 178: 223-230.
- GONZALES DUGO, V; DURAND, J; GASTAL, F y PICON COCHARD C. 2005. Short term response of the nitrogen nutrition status of tall fescue and

Italian ryegrass swards under water deficits. Australian Journal of Agricultural Research.

HUBER, A. 1970, Diez años de observaciones climatológicas en la Estación Teja-Valdivia (Chile) 1960-1969. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Austral de Chile. 46 p.

KEMP, P y GRAENE, J. 1994. Phosphorus efficiency in pasture Species. VIII. Ontogeny, Growth, P acquisition and P utilization of Italian Ryegrass and phalaris under P Deficient and P Sufficient conditions. Department of Agronomy and soil Science, University, Palmerton North, New Zealand.

KEPPLER, B y RICKMAN, R. 1990. Modeling crop root growth and function. Advances in Agronomy 44: 113-131

MA, Z; BASKIN, T BROWN, K y LYNCH, J. 2003 Regulation of root elongation under phosphorus stress involves changes in the ethylene responsiveness. Plant Physiology. 131:1381-1390.

MARSCHNER, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2 th ed. London, England. Academic press.887 p.

MENGEL, K y KIRKBY, E. 1982. Principles of Plant Nutrition. Alemania International Potash Institute.655 p.

MIRANDA, G. 2005. Producción de raíces de trigo, papas, y arvejas creciendo bajo distintos niveles de fósforo. Tesis Lic Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. 129 p.

- MONTALDO, P. y FUENTES, R. 1980, Caracterización térmica y fotoperiódica para el área de Valdivia. Agro Sur, Chile 8 (2) 94-105.
- MURPHY, L y SMUCKER, A. 1995. Evaluation of video image analysis and line-intercept methods for measuring root systems of alfalfa and ryegrass. Agronomy journal. 87 :865-868
- NEWMAN, E 1966. A Method estimating the total length of root in a sample. Agriculture Journal Research. 3 139-135.
- PAN , W y BOLTON R. 1991. Root quantification by edge discrimination using a desktop scanner. Agronomy journal. 83: 1047-1052.
- PEILING, Y; SHUMEI, R y XIANLONG, L 1999. Away to regulate root/shoot growth of Winter wheat taking wáter as the governing factor. Proceeding of 99 international conferences on agricultural Engineering. Beijing China. Pp
- PINOCHET, D. 2002. Manual de interpretación de análisis de suelo para la fertilización con Nitrógeno, Fósforo y Potasio y Control de la acidez para los cultivos de Chile. Serie de apuntes de Nutrición de cultivos, Universidad Austral de Chile.
- PINOCHET, D. 2004. Guía de fertilización de praderas permanentes. Universidad Austral de Chile Facultad de Ciencias agrarias.14 p
- REGENT INSTRUMENTS INC. 2003. WINRhizo for washed root measurement.
<http://www.regent.qc.ca/products/rhizo/Rhizo.html>.

- RODRIGUEZ, J. 1993 La fertilización de los cultivos. Un método racional. Departamento de Ciencias Vegetales, Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. 406 p.
- RODRIGUEZ, J; PINOCHET, D y MATUS, F. 2001. Fertilización de los cultivos. Santiago, Chile. Ed LOM. 117 p.
- ROWELL, D. 1993. Soil Science. Methods and Application. Department of Soil Science. University of Reading. UK. 284 p.
- STRATBURGUER, E. 2000. Tratado de Botánica. Barcelona, España. Omega. 1994. 1068 p.
- TENNANT 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. Journal ecology 63: 995-1000.
- TORO, J. 1979 Determinación de la densidad radical mediante el métodos de las intersecciones. Tesis Lic. Agr. Santiago. Universidad de Chile Facultad de Agronomía. 84 p.
- TOSSO, J. 1985. Suelos volcánicos de Chile. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile. 723 p.
- USA, UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. 2003 Key to soil taxonomy. Ninth edition. National Resource Conservation services. 314p.
- VAN NOORDWIJK, M y DE WILLINGEN, P. 1987b. Roots, plant and nutrient use efficiency. Thesis Dr Ph agricultural University Wageningen. Holland. 282 p.

ANEXOS

ANEXO 1 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de noviembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $0 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|--------|-------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 13,331 | 14,787 | 7,784 | 11,967 | 3,695 |
| 10 | 5,219 | 6,115 | 2,942 | 4,758 | 1,636 |
| 15 | 3,041 | 1,843 | 2,199 | 2,361 | 0,615 |
| 20 | 2,286 | 1,495 | 1,510 | 1,764 | 0,452 |
| 25 | 2,283 | 1,501 | 1,937 | 1,907 | 0,392 |
| 30 | 1,658 | 1,308 | 2,015 | 1,660 | 0,353 |
| 35 | 1,577 | 1,042 | 1,276 | 1,298 | 0,269 |
| 40 | 1,134 | 0,877 | 1,769 | 1,260 | 0,459 |
| 45 | 0,939 | 0,827 | 0,838 | 0,868 | 0,062 |
| 50 | 0,937 | 0,744 | 0,936 | 0,872 | 0,111 |
| 55 | 0,794 | 0,427 | 0,678 | 0,633 | 0,188 |
| 60 | 0,653 | 0,366 | 0,550 | 0,523 | 0,145 |
| 65 | 0,496 | 0,336 | 0,567 | 0,467 | 0,118 |
| 70 | 0,428 | 0,381 | 0,372 | 0,394 | 0,030 |
| 75 | 0,397 | 0,300 | 0,376 | 0,358 | 0,051 |
| 80 | 0,380 | 0,290 | 0,324 | 0,331 | 0,045 |
| 85 | 0,321 | 0,297 | 0,288 | 0,302 | 0,017 |
| 90 | 0,297 | 0,264 | 0,268 | 0,276 | 0,018 |
| 95 | 0,270 | 0,267 | 0,264 | 0,267 | 0,003 |
| 100 | 0,339 | 0,210 | 0,271 | 0,273 | 0,065 |
| 105 | 0,375 | 0,264 | 0,295 | 0,311 | 0,057 |
| 110 | 0,259 | 0,234 | 0,210 | 0,234 | 0,025 |
| 115 | 0,237 | 0,242 | 0,220 | 0,233 | 0,011 |
| 120 | 0,244 | 0,239 | 0,204 | 0,229 | 0,022 |
| 125 | 0,209 | 0,193 | 0,240 | 0,214 | 0,024 |

ANEXO 2 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de noviembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $55 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|-------|-------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 21,568 | 8,001 | 8,311 | 12,627 | 7,745 |
| 10 | 2,073 | 3,608 | 4,759 | 3,480 | 1,347 |
| 15 | 1,437 | 2,611 | 3,506 | 2,518 | 1,038 |
| 20 | 1,279 | 2,162 | 2,393 | 1,945 | 0,588 |
| 25 | 1,725 | 2,126 | 2,207 | 2,019 | 0,259 |
| 30 | 1,544 | 1,697 | 2,132 | 1,791 | 0,305 |
| 35 | 1,293 | 1,366 | 1,604 | 1,421 | 0,163 |
| 40 | 1,004 | 1,214 | 1,415 | 1,211 | 0,205 |
| 45 | 0,712 | 1,157 | 1,234 | 1,034 | 0,281 |
| 50 | 0,621 | 0,745 | 1,169 | 0,845 | 0,288 |
| 55 | 0,444 | 0,821 | 0,883 | 0,716 | 0,237 |
| 60 | 0,402 | 0,729 | 0,834 | 0,655 | 0,226 |
| 65 | 0,472 | 0,394 | 0,825 | 0,564 | 0,229 |
| 70 | 0,416 | 0,507 | 0,577 | 0,500 | 0,081 |
| 75 | 0,432 | 0,243 | 0,535 | 0,404 | 0,148 |
| 80 | 0,394 | 0,345 | 0,487 | 0,409 | 0,073 |
| 85 | 0,327 | 0,189 | 0,394 | 0,303 | 0,105 |
| 90 | 0,296 | 0,360 | 0,322 | 0,326 | 0,032 |
| 95 | 0,335 | 0,301 | 0,305 | 0,314 | 0,019 |
| 100 | 0,280 | 0,274 | 0,308 | 0,287 | 0,018 |
| 105 | 0,269 | 0,268 | 0,288 | 0,275 | 0,011 |
| 110 | 0,274 | 0,252 | 0,263 | 0,263 | 0,011 |
| 115 | 0,239 | 0,210 | 0,241 | 0,230 | 0,017 |
| 120 | 0,210 | 0,234 | 0,231 | 0,225 | 0,013 |
| 125 | 0,243 | 0,231 | 0,150 | 0,208 | 0,050 |

ANEXO 3 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de noviembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|--------|--------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 13,855 | 13,985 | 18,351 | 15,397 | 2,559 |
| 10 | 3,987 | 5,841 | 7,052 | 5,627 | 1,544 |
| 15 | 1,862 | 2,720 | 3,347 | 2,643 | 0,746 |
| 20 | 1,360 | 2,409 | 3,389 | 2,386 | 1,015 |
| 25 | 1,018 | 1,904 | 2,502 | 1,808 | 0,747 |
| 30 | 1,358 | 1,370 | 3,180 | 1,969 | 1,049 |
| 35 | 1,449 | 1,302 | 2,398 | 1,716 | 0,595 |
| 40 | 1,686 | 1,625 | 1,831 | 1,714 | 0,106 |
| 45 | 1,310 | 1,438 | 1,660 | 1,469 | 0,177 |
| 50 | 0,967 | 1,170 | 1,398 | 1,178 | 0,215 |
| 55 | 0,911 | 0,834 | 1,310 | 1,018 | 0,255 |
| 60 | 0,745 | 0,618 | 1,103 | 0,822 | 0,251 |
| 65 | 0,834 | 0,972 | 1,137 | 0,981 | 0,152 |
| 70 | 0,705 | 0,601 | 1,011 | 0,773 | 0,213 |
| 75 | 0,525 | 0,530 | 0,953 | 0,669 | 0,245 |
| 80 | 0,508 | 0,380 | 0,910 | 0,599 | 0,276 |
| 85 | 0,428 | 0,343 | 0,856 | 0,542 | 0,275 |
| 90 | 0,334 | 0,206 | 0,859 | 0,466 | 0,346 |
| 95 | 0,282 | 0,143 | 0,692 | 0,372 | 0,285 |
| 100 | 0,290 | 0,161 | 0,661 | 0,371 | 0,259 |
| 105 | 0,295 | 0,199 | 0,564 | 0,353 | 0,189 |
| 110 | 0,260 | 0,160 | 0,531 | 0,317 | 0,192 |
| 115 | 0,273 | 0,263 | 0,388 | 0,308 | 0,070 |
| 120 | 0,269 | 0,151 | 0,460 | 0,293 | 0,156 |
| 125 | 0,335 | 0,121 | 0,408 | 0,288 | 0,149 |

ANEXO 4 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de noviembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $220 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|--------|-------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 14,704 | 18,060 | 8,063 | 13,609 | 5,087 |
| 10 | 4,618 | 3,711 | 4,834 | 4,388 | 0,596 |
| 15 | 2,885 | 2,648 | 2,094 | 2,542 | 0,406 |
| 20 | 2,457 | 1,989 | 1,846 | 2,097 | 0,320 |
| 25 | 2,140 | 1,755 | 1,743 | 1,879 | 0,225 |
| 30 | 1,989 | 17,680 | 2,119 | 7,263 | 9,022 |
| 35 | 1,739 | 1,474 | 1,570 | 1,594 | 0,134 |
| 40 | 1,303 | 2,062 | 1,367 | 1,577 | 0,421 |
| 45 | 1,424 | 1,193 | 1,142 | 1,253 | 0,150 |
| 50 | 1,265 | 1,093 | 1,137 | 1,165 | 0,089 |
| 55 | 0,949 | 0,881 | 0,836 | 0,889 | 0,057 |
| 60 | 0,792 | 0,865 | 0,803 | 0,820 | 0,039 |
| 65 | 0,641 | 0,910 | 0,562 | 0,704 | 0,182 |
| 70 | 0,530 | 0,652 | 0,573 | 0,585 | 0,062 |
| 75 | 0,433 | 0,643 | 0,501 | 0,526 | 0,107 |
| 80 | 0,460 | 0,444 | 0,477 | 0,460 | 0,016 |
| 85 | 0,330 | 0,411 | 0,329 | 0,357 | 0,047 |
| 90 | 0,294 | 0,370 | 0,268 | 0,311 | 0,053 |
| 95 | 0,216 | 0,342 | 0,335 | 0,298 | 0,071 |
| 100 | 0,228 | 0,291 | 0,342 | 0,287 | 0,057 |
| 105 | 0,199 | 0,298 | 0,269 | 0,256 | 0,051 |
| 110 | 0,240 | 0,268 | 0,260 | 0,256 | 0,014 |
| 115 | 0,151 | 0,234 | 0,210 | 0,198 | 0,043 |
| 120 | 0,201 | 0,209 | 0,240 | 0,217 | 0,020 |
| 125 | 0,121 | 0,134 | 0,262 | 0,173 | 0,078 |

ANEXO 5 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 19 de diciembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $0 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|-------|-------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 10,865 | 7,363 | 6,826 | 8,351 | 2,193 |
| 10 | 3,929 | 5,318 | 3,934 | 4,394 | 0,800 |
| 15 | 2,567 | 3,356 | 1,742 | 2,555 | 0,807 |
| 20 | 1,117 | 1,283 | 1,258 | 1,219 | 0,089 |
| 25 | 0,933 | 1,568 | 1,289 | 1,263 | 0,318 |
| 30 | 0,818 | 1,434 | 0,667 | 0,973 | 0,406 |
| 35 | 1,197 | 1,312 | 0,978 | 1,162 | 0,170 |
| 40 | 1,740 | 1,816 | 1,077 | 1,545 | 0,406 |
| 45 | 1,197 | 1,617 | 1,092 | 1,302 | 0,278 |
| 50 | 1,123 | 1,343 | 1,108 | 1,191 | 0,132 |
| 55 | 0,894 | 1,222 | 1,070 | 1,062 | 0,164 |
| 60 | 0,886 | 1,135 | 0,978 | 1,000 | 0,126 |
| 65 | 0,785 | 1,052 | 0,840 | 0,892 | 0,141 |
| 70 | 0,852 | 1,098 | 0,652 | 0,867 | 0,224 |
| 75 | 0,689 | 0,908 | 0,354 | 0,650 | 0,279 |
| 80 | 0,698 | 1,119 | 0,348 | 0,721 | 0,386 |
| 85 | 0,671 | 1,070 | 0,343 | 0,695 | 0,364 |
| 90 | 0,347 | 1,090 | 2,977 | 1,471 | 1,356 |
| 95 | 0,497 | 0,877 | 0,270 | 0,548 | 0,307 |
| 100 | 0,405 | 0,715 | 0,263 | 0,461 | 0,231 |
| 105 | 0,318 | 0,670 | 0,187 | 0,392 | 0,249 |
| 110 | 0,273 | 0,268 | 0,107 | 0,216 | 0,094 |
| 115 | 0,238 | 0,262 | 0,108 | 0,203 | 0,083 |
| 120 | 0,201 | 0,000 | 0,096 | 0,099 | 0,100 |
| 125 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

ANEXO 6 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 19 de diciembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $55 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|-------|-------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 7,066 | 6,156 | 7,210 | 6,810 | 0,571 |
| 10 | 2,927 | 3,518 | 4,534 | 3,660 | 0,813 |
| 15 | 1,997 | 1,776 | 3,493 | 2,422 | 0,934 |
| 20 | 1,022 | 1,425 | 1,590 | 1,346 | 0,292 |
| 25 | 1,403 | 1,151 | 1,576 | 1,377 | 0,213 |
| 30 | 1,304 | 0,893 | 1,510 | 1,235 | 0,314 |
| 35 | 1,566 | 0,854 | 1,181 | 1,201 | 0,357 |
| 40 | 1,287 | 1,112 | 1,126 | 1,175 | 0,097 |
| 45 | 1,354 | 1,196 | 1,230 | 1,260 | 0,083 |
| 50 | 1,233 | 1,277 | 1,275 | 1,262 | 0,025 |
| 55 | 0,980 | 0,933 | 1,140 | 1,018 | 0,108 |
| 60 | 0,824 | 0,661 | 0,874 | 0,786 | 0,111 |
| 65 | 0,900 | 0,635 | 0,576 | 0,704 | 0,173 |
| 70 | 0,818 | 0,341 | 0,589 | 0,582 | 0,239 |
| 75 | 0,736 | 0,446 | 0,628 | 0,603 | 0,147 |
| 80 | 0,542 | 0,411 | 0,504 | 0,486 | 0,067 |
| 85 | 0,640 | 0,212 | 0,557 | 0,470 | 0,227 |
| 90 | 0,460 | 0,193 | 0,444 | 0,366 | 0,150 |
| 95 | 0,490 | 0,188 | 0,417 | 0,365 | 0,158 |
| 100 | 0,487 | 0,120 | 0,246 | 0,284 | 0,186 |
| 105 | 0,324 | 0,080 | 0,249 | 0,218 | 0,125 |
| 110 | 0,170 | 0,139 | 0,238 | 0,183 | 0,051 |
| 115 | 0,174 | 0,120 | 0,231 | 0,175 | 0,055 |
| 120 | 0,158 | 0,086 | 0,167 | 0,137 | 0,044 |
| 125 | 0,000 | 0,054 | 0,148 | 0,067 | 0,075 |

ANEXO 7 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 19 de diciembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|-------|-------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 8,165 | 7,731 | 9,552 | 8,483 | 0,951 |
| 10 | 3,937 | 4,813 | 3,365 | 4,038 | 0,729 |
| 15 | 1,463 | 3,691 | 1,500 | 2,218 | 1,276 |
| 20 | 1,162 | 1,936 | 1,622 | 1,573 | 0,389 |
| 25 | 0,854 | 1,631 | 1,357 | 1,281 | 0,394 |
| 30 | 0,896 | 1,351 | 0,982 | 1,076 | 0,242 |
| 35 | 0,864 | 0,980 | 1,428 | 1,091 | 0,298 |
| 40 | 1,401 | 0,970 | 1,586 | 1,319 | 0,316 |
| 45 | 1,070 | 1,544 | 1,421 | 1,345 | 0,246 |
| 50 | 1,248 | 1,507 | 0,995 | 1,250 | 0,256 |
| 55 | 1,122 | 1,414 | 0,816 | 1,117 | 0,299 |
| 60 | 0,799 | 1,190 | 0,781 | 0,923 | 0,231 |
| 65 | 0,654 | 1,120 | 0,731 | 0,835 | 0,250 |
| 70 | 0,702 | 1,043 | 0,644 | 0,796 | 0,215 |
| 75 | 0,836 | 1,002 | 0,566 | 0,801 | 0,220 |
| 80 | 0,888 | 1,140 | 0,531 | 0,853 | 0,306 |
| 85 | 0,945 | 0,910 | 0,498 | 0,785 | 0,249 |
| 90 | 0,758 | 0,958 | 0,455 | 0,724 | 0,253 |
| 95 | 0,475 | 0,793 | 0,389 | 0,552 | 0,213 |
| 100 | 0,361 | 0,304 | 0,428 | 0,364 | 0,062 |
| 105 | 0,263 | 0,220 | 0,286 | 0,256 | 0,033 |
| 110 | 0,201 | 0,151 | 0,264 | 0,205 | 0,057 |
| 115 | 0,150 | 0,207 | 0,267 | 0,208 | 0,059 |
| 120 | 0,152 | 0,000 | 0,228 | 0,127 | 0,116 |
| 125 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

ANEXO 8 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 19 de diciembre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $220 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|-------|-------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 4,361 | 7,137 | 5,749 | 5,749 | 1,388 |
| 10 | 4,846 | 5,116 | 4,981 | 4,981 | 0,135 |
| 15 | 2,553 | 2,216 | 2,385 | 2,385 | 0,168 |
| 20 | 1,558 | 1,305 | 1,432 | 1,432 | 0,127 |
| 25 | 1,578 | 2,284 | 1,931 | 1,931 | 0,353 |
| 30 | 1,509 | 1,600 | 1,554 | 1,554 | 0,045 |
| 35 | 2,135 | 1,145 | 1,640 | 1,640 | 0,495 |
| 40 | 1,123 | 0,870 | 0,996 | 0,996 | 0,126 |
| 45 | 1,530 | 1,010 | 1,270 | 1,270 | 0,260 |
| 50 | 1,568 | 0,894 | 1,231 | 1,231 | 0,337 |
| 55 | 1,399 | 0,846 | 1,123 | 1,123 | 0,276 |
| 60 | 1,213 | 0,948 | 1,080 | 1,080 | 0,133 |
| 65 | 0,870 | 0,626 | 0,748 | 0,748 | 0,122 |
| 70 | 0,966 | 0,634 | 0,800 | 0,800 | 0,166 |
| 75 | 1,194 | 0,551 | 0,872 | 0,872 | 0,322 |
| 80 | 1,044 | 0,528 | 0,786 | 0,786 | 0,258 |
| 85 | 0,830 | 2,092 | 1,461 | 1,461 | 0,631 |
| 90 | 0,847 | 0,455 | 0,651 | 0,651 | 0,196 |
| 95 | 0,473 | 0,268 | 0,371 | 0,371 | 0,103 |
| 100 | 0,429 | 0,262 | 0,345 | 0,345 | 0,083 |
| 105 | 0,391 | 0,268 | 0,329 | 0,329 | 0,062 |
| 110 | 0,321 | 0,239 | 0,280 | 0,280 | 0,041 |
| 115 | 0,267 | 0,241 | 0,254 | 0,254 | 0,013 |
| 120 | 0,209 | 0,000 | 0,104 | 0,104 | 0,104 |
| 125 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

ANEXO 9 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 13 de enero con sus tres repeticiones para el tratamiento de $0 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|--------|-------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 9,503 | 10,404 | 8,113 | 9,340 | 1,154 |
| 10 | 3,406 | 3,958 | 4,530 | 3,965 | 0,562 |
| 15 | 2,935 | 2,128 | 1,911 | 2,325 | 0,540 |
| 20 | 1,168 | 1,407 | 1,418 | 1,331 | 0,142 |
| 25 | 1,571 | 1,393 | 1,079 | 1,348 | 0,249 |
| 30 | 0,891 | 1,256 | 1,453 | 1,200 | 0,285 |
| 35 | 0,926 | 1,260 | 1,591 | 1,259 | 0,332 |
| 40 | 1,543 | 0,916 | 1,591 | 1,350 | 0,377 |
| 45 | 0,819 | 1,291 | 1,212 | 1,107 | 0,253 |
| 50 | 1,045 | 1,289 | 0,993 | 1,109 | 0,158 |
| 55 | 0,749 | 1,169 | 0,741 | 0,886 | 0,245 |
| 60 | 0,561 | 1,034 | 0,562 | 0,719 | 0,273 |
| 65 | 0,668 | 0,582 | 0,644 | 0,631 | 0,045 |
| 70 | 0,691 | 0,850 | 0,519 | 0,687 | 0,166 |
| 75 | 0,629 | 0,673 | 0,518 | 0,607 | 0,080 |
| 80 | 0,573 | 0,588 | 0,493 | 0,551 | 0,051 |
| 85 | 0,613 | 0,680 | 0,434 | 0,576 | 0,127 |
| 90 | 0,715 | 0,694 | 0,541 | 0,650 | 0,095 |
| 95 | 0,691 | 0,915 | 0,614 | 0,740 | 0,156 |
| 100 | 0,444 | 0,637 | 0,416 | 0,499 | 0,120 |
| 105 | 0,387 | 0,601 | 0,387 | 0,458 | 0,123 |
| 110 | 0,307 | 0,669 | 0,263 | 0,413 | 0,222 |
| 115 | 0,209 | 0,425 | 0,103 | 0,246 | 0,164 |
| 120 | 0,115 | 0,380 | 0,120 | 0,205 | 0,151 |
| 125 | 0,112 | 0,128 | 0,102 | 0,114 | 0,013 |

ANEXO 10 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 13 de enero con sus tres repeticiones para el tratamiento de $55 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad d (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|--------------------------|----------------------------|-------|-------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 14,336 | 9,836 | 7,839 | 10,670 | 3,328 |
| 10 | 5,081 | 3,760 | 4,717 | 4,519 | 0,682 |
| 15 | 2,839 | 1,471 | 3,597 | 2,636 | 1,077 |
| 20 | 1,541 | 1,785 | 1,672 | 1,666 | 0,122 |
| 25 | 1,659 | 0,986 | 1,639 | 1,428 | 0,383 |
| 30 | 1,333 | 1,311 | 1,814 | 1,486 | 0,284 |
| 35 | 0,911 | 1,434 | 1,156 | 1,167 | 0,262 |
| 40 | 1,061 | 1,289 | 1,332 | 1,227 | 0,146 |
| 45 | 0,936 | 1,088 | 1,048 | 1,024 | 0,079 |
| 50 | 0,733 | 1,177 | 0,969 | 0,960 | 0,222 |
| 55 | 0,707 | 0,795 | 0,911 | 0,804 | 0,102 |
| 60 | 0,844 | 0,884 | 0,756 | 0,828 | 0,066 |
| 65 | 0,571 | 0,916 | 0,872 | 0,786 | 0,187 |
| 70 | 0,639 | 0,845 | 0,719 | 0,734 | 0,104 |
| 75 | 0,572 | 1,070 | 0,525 | 0,722 | 0,302 |
| 80 | 0,537 | 0,712 | 0,601 | 0,617 | 0,089 |
| 85 | 0,497 | 0,719 | 0,964 | 0,727 | 0,234 |
| 90 | 0,450 | 0,703 | 0,418 | 0,524 | 0,156 |
| 95 | 0,479 | 0,573 | 0,422 | 0,491 | 0,077 |
| 100 | 0,438 | 0,802 | 0,434 | 0,558 | 0,211 |
| 105 | 0,534 | 0,755 | 0,375 | 0,555 | 0,191 |
| 110 | 0,556 | 0,800 | 0,273 | 0,543 | 0,264 |
| 115 | 0,468 | 0,496 | 0,213 | 0,393 | 0,156 |
| 120 | 0,665 | 0,465 | 0,268 | 0,466 | 0,199 |
| 125 | 0,419 | 0,246 | 0,083 | 0,249 | 0,168 |

ANEXO 11 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 13 de enero con sus tres repeticiones para el tratamiento de $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|--------|--------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 16,479 | 17,339 | 17,145 | 16,988 | 0,451 |
| 10 | 2,898 | 5,856 | 1,880 | 3,545 | 2,066 |
| 15 | 2,286 | 2,055 | 1,647 | 1,996 | 0,323 |
| 20 | 1,687 | 1,421 | 2,063 | 1,724 | 0,322 |
| 25 | 1,477 | 1,542 | 1,701 | 1,573 | 0,116 |
| 30 | 1,177 | 1,644 | 1,543 | 1,455 | 0,246 |
| 35 | 0,889 | 1,562 | 2,039 | 1,497 | 0,578 |
| 40 | 1,005 | 1,587 | 1,754 | 1,449 | 0,394 |
| 45 | 0,873 | 1,003 | 1,322 | 1,066 | 0,231 |
| 50 | 0,578 | 1,052 | 1,234 | 0,955 | 0,339 |
| 55 | 0,781 | 1,109 | 1,066 | 0,985 | 0,178 |
| 60 | 0,673 | 0,830 | 1,193 | 0,898 | 0,267 |
| 65 | 0,621 | 0,811 | 0,846 | 0,760 | 0,121 |
| 70 | 0,628 | 0,940 | 0,763 | 0,777 | 0,156 |
| 75 | 0,656 | 1,010 | 0,736 | 0,801 | 0,186 |
| 80 | 0,562 | 0,978 | 0,880 | 0,807 | 0,218 |
| 85 | 0,548 | 0,947 | 0,873 | 0,789 | 0,212 |
| 90 | 0,814 | 0,730 | 0,936 | 0,827 | 0,104 |
| 95 | 0,750 | 0,957 | 1,143 | 0,950 | 0,197 |
| 100 | 0,565 | 0,757 | 0,849 | 0,724 | 0,145 |
| 105 | 0,410 | 1,024 | 0,621 | 0,685 | 0,312 |
| 110 | 0,258 | 0,899 | 0,538 | 0,565 | 0,321 |
| 115 | 0,213 | 0,712 | 0,476 | 0,467 | 0,250 |
| 120 | 0,197 | 0,423 | 2,680 | 1,100 | 1,373 |
| 125 | 0,161 | 0,670 | 0,238 | 0,356 | 0,274 |

ANEXO 12 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 13 de enero con sus tres repeticiones para el tratamiento de $220 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|--------|-------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 13,681 | 11,420 | 9,723 | 11,608 | 1,986 |
| 10 | 7,108 | 6,992 | 5,362 | 6,487 | 0,976 |
| 15 | 3,670 | 2,903 | 2,098 | 2,890 | 0,786 |
| 20 | 1,817 | 2,130 | 1,561 | 1,836 | 0,285 |
| 25 | 2,105 | 2,594 | 1,211 | 1,970 | 0,702 |
| 30 | 1,104 | 1,541 | 1,577 | 1,407 | 0,263 |
| 35 | 1,297 | 1,251 | 1,355 | 1,301 | 0,052 |
| 40 | 0,939 | 1,685 | 1,406 | 1,343 | 0,377 |
| 45 | 1,126 | 1,587 | 1,375 | 1,363 | 0,230 |
| 50 | 0,987 | 1,776 | 1,357 | 1,373 | 0,395 |
| 55 | 0,843 | 1,716 | 1,156 | 1,238 | 0,443 |
| 60 | 0,758 | 1,592 | 1,015 | 1,122 | 0,427 |
| 65 | 0,599 | 1,174 | 0,882 | 0,885 | 0,287 |
| 70 | 0,487 | 1,416 | 0,934 | 0,946 | 0,465 |
| 75 | 0,834 | 1,202 | 0,899 | 0,978 | 0,196 |
| 80 | 0,779 | 1,305 | 1,074 | 1,053 | 0,264 |
| 85 | 0,511 | 1,141 | 0,648 | 0,767 | 0,331 |
| 90 | 0,579 | 1,106 | 0,737 | 0,807 | 0,270 |
| 95 | 0,626 | 0,899 | 0,925 | 0,817 | 0,166 |
| 100 | 0,732 | 0,942 | 0,647 | 0,774 | 0,152 |
| 105 | 0,683 | 0,914 | 0,655 | 0,751 | 0,142 |
| 110 | 0,614 | 0,710 | 0,742 | 0,689 | 0,067 |
| 115 | 0,532 | 0,847 | 0,744 | 0,708 | 0,161 |
| 120 | 0,405 | 1,034 | 0,840 | 0,760 | 0,322 |
| 125 | 0,279 | 0,835 | 0,585 | 0,567 | 0,278 |

ANEXO 13 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 27 de Agosto con sus tres repeticiones para el tratamiento de $0 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|--------|-------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 7,678 | 19,925 | 9,874 | 12,492 | 6,530 |
| 10 | 4,139 | 8,293 | 5,435 | 5,956 | 2,125 |
| 15 | 2,868 | 3,115 | 3,075 | 3,019 | 0,132 |
| 20 | 2,213 | 1,998 | 2,062 | 2,091 | 0,111 |
| 25 | 1,195 | 2,031 | 2,183 | 1,803 | 0,532 |
| 30 | 1,165 | 1,740 | 1,921 | 1,609 | 0,395 |
| 35 | 1,524 | 1,508 | 2,054 | 1,695 | 0,311 |
| 40 | 1,418 | 1,104 | 1,825 | 1,449 | 0,362 |
| 45 | 1,016 | 1,063 | 1,802 | 1,294 | 0,441 |
| 50 | 0,744 | 1,132 | 1,079 | 0,985 | 0,211 |
| 55 | 0,820 | 0,675 | 0,986 | 0,827 | 0,156 |
| 60 | 0,559 | 0,728 | 0,723 | 0,670 | 0,096 |
| 65 | 0,375 | 0,890 | 0,544 | 0,603 | 0,262 |
| 70 | 0,347 | 0,480 | 0,569 | 0,465 | 0,112 |
| 75 | 0,264 | 0,391 | 0,649 | 0,434 | 0,196 |
| 80 | 0,334 | 0,366 | 0,365 | 0,355 | 0,018 |
| 85 | 0,338 | 0,248 | 0,401 | 0,329 | 0,077 |
| 90 | 0,218 | 0,231 | 0,333 | 0,261 | 0,063 |
| 95 | 0,214 | 0,469 | 0,273 | 0,319 | 0,134 |
| 100 | 0,214 | 0,362 | 0,307 | 0,294 | 0,075 |
| 105 | 0,210 | 0,210 | 0,261 | 0,227 | 0,030 |
| 110 | 0,179 | 0,237 | 0,132 | 0,183 | 0,052 |
| 115 | 0,176 | 0,189 | 0,187 | 0,184 | 0,007 |
| 120 | 0,170 | 0,318 | 0,158 | 0,215 | 0,089 |
| 125 | 0,183 | 0,260 | 0,161 | 0,201 | 0,052 |

ANEXO 14 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 27 de Agosto con sus tres repeticiones para el tratamiento de $55 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|--------|--------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 12,227 | 10,842 | 13,663 | 12,244 | 1,410 |
| 10 | 6,935 | 5,887 | 5,003 | 5,942 | 0,967 |
| 15 | 2,915 | 2,087 | 2,818 | 2,607 | 0,453 |
| 20 | 2,004 | 2,017 | 1,602 | 1,874 | 0,236 |
| 25 | 2,029 | 1,826 | 2,549 | 2,135 | 0,373 |
| 30 | 1,570 | 1,392 | 2,186 | 1,716 | 0,417 |
| 35 | 1,236 | 1,409 | 1,936 | 1,527 | 0,364 |
| 40 | 1,441 | 2,048 | 2,183 | 1,891 | 0,396 |
| 45 | 1,441 | 1,548 | 1,520 | 1,503 | 0,056 |
| 50 | 1,102 | 0,965 | 1,285 | 1,117 | 0,161 |
| 55 | 0,833 | 1,117 | 0,831 | 0,927 | 0,165 |
| 60 | 0,547 | 1,056 | 0,785 | 0,796 | 0,255 |
| 65 | 0,372 | 0,501 | 0,737 | 0,537 | 0,185 |
| 70 | 0,381 | 0,340 | 0,756 | 0,492 | 0,230 |
| 75 | 0,319 | 0,560 | 0,655 | 0,511 | 0,173 |
| 80 | 0,420 | 0,569 | 0,521 | 0,503 | 0,076 |
| 85 | 0,206 | 0,315 | 0,444 | 0,322 | 0,119 |
| 90 | 0,226 | 0,253 | 0,368 | 0,283 | 0,075 |
| 95 | 0,254 | 0,158 | 0,293 | 0,235 | 0,069 |
| 100 | 0,155 | 0,106 | 0,369 | 0,210 | 0,140 |
| 105 | 0,150 | 0,106 | 0,254 | 0,170 | 0,076 |
| 110 | 0,182 | 0,149 | 0,144 | 0,158 | 0,021 |
| 115 | 0,133 | 0,143 | 0,125 | 0,134 | 0,009 |
| 120 | 0,107 | 0,152 | 0,143 | 0,134 | 0,024 |
| 125 | 0,089 | 0,079 | 0,098 | 0,089 | 0,009 |

ANEXO 15 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 27 de Agosto con sus tres repeticiones para el tratamiento de $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|--------|--------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 12,428 | 11,727 | 14,128 | 12,761 | 1,234 |
| 10 | 6,088 | 9,784 | 2,878 | 6,250 | 3,456 |
| 15 | 5,252 | 5,771 | 4,306 | 5,110 | 0,743 |
| 20 | 3,813 | 2,247 | 2,953 | 3,004 | 0,785 |
| 25 | 3,035 | 1,943 | 3,055 | 2,678 | 0,636 |
| 30 | 2,881 | 1,443 | 2,253 | 2,192 | 0,721 |
| 35 | 2,297 | 1,360 | 1,333 | 1,663 | 0,549 |
| 40 | 2,398 | 1,512 | 2,252 | 2,054 | 0,475 |
| 45 | 1,902 | 1,720 | 2,432 | 2,018 | 0,370 |
| 50 | 1,493 | 1,550 | 1,629 | 1,557 | 0,068 |
| 55 | 0,871 | 0,966 | 1,109 | 0,982 | 0,120 |
| 60 | 0,546 | 0,810 | 0,792 | 0,716 | 0,147 |
| 65 | 0,487 | 0,467 | 0,655 | 0,536 | 0,103 |
| 70 | 0,381 | 0,779 | 0,786 | 0,649 | 0,232 |
| 75 | 0,376 | 0,465 | 0,458 | 0,433 | 0,050 |
| 80 | 0,335 | 0,496 | 0,260 | 0,364 | 0,121 |
| 85 | 0,513 | 0,395 | 0,127 | 0,345 | 0,198 |
| 90 | 0,335 | 0,446 | 0,209 | 0,330 | 0,118 |
| 95 | 0,267 | 0,319 | 0,181 | 0,256 | 0,070 |
| 100 | 0,260 | 0,197 | 0,102 | 0,186 | 0,079 |
| 105 | 0,219 | 0,243 | 0,135 | 0,199 | 0,057 |
| 110 | 0,139 | 0,125 | 0,099 | 0,121 | 0,020 |
| 115 | 0,150 | 0,270 | 0,149 | 0,190 | 0,070 |
| 120 | 0,125 | 0,154 | 0,144 | 0,141 | 0,015 |
| 125 | 0,121 | 0,137 | 0,041 | 0,100 | 0,051 |

ANEXO 16 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 27 de Agosto con sus tres repeticiones para el tratamiento de $220 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|--------|--------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 11,985 | 15,046 | 13,516 | 13,516 | 1,530 |
| 10 | 7,677 | 7,644 | 7,660 | 7,660 | 0,017 |
| 15 | 4,526 | 4,221 | 4,373 | 4,373 | 0,152 |
| 20 | 2,019 | 2,293 | 2,156 | 2,156 | 0,137 |
| 25 | 1,677 | 2,048 | 1,863 | 1,863 | 0,186 |
| 30 | 1,097 | 2,219 | 1,658 | 1,658 | 0,561 |
| 35 | 0,977 | 1,773 | 1,375 | 1,375 | 0,398 |
| 40 | 1,010 | 2,157 | 1,584 | 1,584 | 0,574 |
| 45 | 1,003 | 1,307 | 1,155 | 1,155 | 0,152 |
| 50 | 1,422 | 0,915 | 1,168 | 1,168 | 0,254 |
| 55 | 1,163 | 0,836 | 0,999 | 0,999 | 0,163 |
| 60 | 0,769 | 0,849 | 0,809 | 0,809 | 0,040 |
| 65 | 0,396 | 0,657 | 0,527 | 0,527 | 0,130 |
| 70 | 0,378 | 0,591 | 0,485 | 0,485 | 0,106 |
| 75 | 0,495 | 0,662 | 0,579 | 0,579 | 0,083 |
| 80 | 0,483 | 0,403 | 0,443 | 0,443 | 0,040 |
| 85 | 0,447 | 0,452 | 0,450 | 0,450 | 0,003 |
| 90 | 0,224 | 0,224 | 0,224 | 0,224 | 0,000 |
| 95 | 0,291 | 0,395 | 0,343 | 0,343 | 0,052 |
| 100 | 0,290 | 0,300 | 0,295 | 0,295 | 0,005 |
| 105 | 0,254 | 0,153 | 0,203 | 0,203 | 0,050 |
| 110 | 0,252 | 0,154 | 0,203 | 0,203 | 0,049 |
| 115 | 0,210 | 0,286 | 0,248 | 0,248 | 0,038 |
| 120 | 0,204 | 0,257 | 0,230 | 0,230 | 0,026 |
| 125 | 0,162 | 0,173 | 0,168 | 0,168 | 0,005 |

ANEXO 17 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de octubre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $0 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|--------|-------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 7,678 | 19,925 | 9,874 | 12,492 | 6,530 |
| 10 | 4,139 | 8,293 | 5,435 | 5,956 | 2,125 |
| 15 | 2,868 | 3,115 | 3,075 | 3,019 | 0,132 |
| 20 | 2,213 | 1,998 | 2,062 | 2,091 | 0,111 |
| 25 | 1,195 | 2,031 | 2,183 | 1,803 | 0,532 |
| 30 | 1,165 | 1,740 | 1,921 | 1,609 | 0,395 |
| 35 | 1,524 | 1,508 | 2,054 | 1,695 | 0,311 |
| 40 | 1,418 | 1,104 | 1,825 | 1,449 | 0,362 |
| 45 | 1,016 | 1,063 | 1,802 | 1,294 | 0,441 |
| 50 | 0,744 | 1,132 | 1,079 | 0,985 | 0,211 |
| 55 | 0,820 | 0,675 | 0,986 | 0,827 | 0,156 |
| 60 | 0,559 | 0,728 | 0,723 | 0,670 | 0,096 |
| 65 | 0,375 | 0,890 | 0,544 | 0,603 | 0,262 |
| 70 | 0,347 | 0,480 | 0,569 | 0,465 | 0,112 |
| 75 | 0,264 | 0,391 | 0,649 | 0,434 | 0,196 |
| 80 | 0,334 | 0,366 | 0,365 | 0,355 | 0,018 |
| 85 | 0,338 | 0,248 | 0,401 | 0,329 | 0,077 |
| 90 | 0,218 | 0,231 | 0,333 | 0,261 | 0,063 |
| 95 | 0,214 | 0,469 | 0,273 | 0,319 | 0,134 |
| 100 | 0,214 | 0,362 | 0,307 | 0,294 | 0,075 |
| 105 | 0,210 | 0,210 | 0,261 | 0,227 | 0,030 |
| 110 | 0,179 | 0,237 | 0,132 | 0,183 | 0,052 |
| 115 | 0,176 | 0,189 | 0,187 | 0,184 | 0,007 |
| 120 | 0,170 | 0,318 | 0,158 | 0,215 | 0,089 |
| 125 | 0,183 | 0,260 | 0,161 | 0,201 | 0,052 |

ANEXO 18 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de octubre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $55 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|--------|--------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 12,227 | 10,842 | 13,663 | 12,244 | 1,410 |
| 10 | 6,935 | 5,887 | 5,003 | 5,942 | 0,967 |
| 15 | 2,915 | 2,087 | 2,818 | 2,607 | 0,453 |
| 20 | 2,004 | 2,017 | 1,602 | 1,874 | 0,236 |
| 25 | 2,029 | 1,826 | 2,549 | 2,135 | 0,373 |
| 30 | 1,570 | 1,392 | 2,186 | 1,716 | 0,417 |
| 35 | 1,236 | 1,409 | 1,936 | 1,527 | 0,364 |
| 40 | 1,441 | 2,048 | 2,183 | 1,891 | 0,396 |
| 45 | 1,441 | 1,548 | 1,520 | 1,503 | 0,056 |
| 50 | 1,102 | 0,965 | 1,285 | 1,117 | 0,161 |
| 55 | 0,833 | 1,117 | 0,831 | 0,927 | 0,165 |
| 60 | 0,547 | 1,056 | 0,785 | 0,796 | 0,255 |
| 65 | 0,372 | 0,501 | 0,737 | 0,537 | 0,185 |
| 70 | 0,381 | 0,340 | 0,756 | 0,492 | 0,230 |
| 75 | 0,319 | 0,560 | 0,655 | 0,511 | 0,173 |
| 80 | 0,420 | 0,569 | 0,521 | 0,503 | 0,076 |
| 85 | 0,206 | 0,315 | 0,444 | 0,322 | 0,119 |
| 90 | 0,226 | 0,253 | 0,368 | 0,283 | 0,075 |
| 95 | 0,254 | 0,158 | 0,293 | 0,235 | 0,069 |
| 100 | 0,155 | 0,106 | 0,369 | 0,210 | 0,140 |
| 105 | 0,150 | 0,106 | 0,254 | 0,170 | 0,076 |
| 110 | 0,182 | 0,149 | 0,144 | 0,158 | 0,021 |
| 115 | 0,133 | 0,143 | 0,125 | 0,134 | 0,009 |
| 120 | 0,107 | 0,152 | 0,143 | 0,134 | 0,024 |
| 125 | 0,089 | 0,079 | 0,098 | 0,089 | 0,009 |

ANEXO 19 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de octubre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $110 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|------------------|----------------------------|--------|--------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 12,428 | 11,727 | 14,128 | 12,761 | 1,234 |
| 10 | 6,088 | 9,784 | 2,878 | 6,250 | 3,456 |
| 15 | 5,252 | 5,771 | 4,306 | 5,110 | 0,743 |
| 20 | 3,813 | 2,247 | 2,953 | 3,004 | 0,785 |
| 25 | 3,035 | 1,943 | 3,055 | 2,678 | 0,636 |
| 30 | 2,881 | 1,443 | 2,253 | 2,192 | 0,721 |
| 35 | 2,297 | 1,360 | 1,333 | 1,663 | 0,549 |
| 40 | 2,398 | 1,512 | 2,252 | 2,054 | 0,475 |
| 45 | 1,902 | 1,720 | 2,432 | 2,018 | 0,370 |
| 50 | 1,493 | 1,550 | 1,629 | 1,557 | 0,068 |
| 55 | 0,871 | 0,966 | 1,109 | 0,982 | 0,120 |
| 60 | 0,546 | 0,810 | 0,792 | 0,716 | 0,147 |
| 65 | 0,487 | 0,467 | 0,655 | 0,536 | 0,103 |
| 70 | 0,381 | 0,779 | 0,786 | 0,649 | 0,232 |
| 75 | 0,376 | 0,465 | 0,458 | 0,433 | 0,050 |
| 80 | 0,335 | 0,496 | 0,260 | 0,364 | 0,121 |
| 85 | 0,513 | 0,395 | 0,127 | 0,345 | 0,198 |
| 90 | 0,335 | 0,446 | 0,209 | 0,330 | 0,118 |
| 95 | 0,267 | 0,319 | 0,181 | 0,256 | 0,070 |
| 100 | 0,260 | 0,197 | 0,102 | 0,186 | 0,079 |
| 105 | 0,219 | 0,243 | 0,135 | 0,199 | 0,057 |
| 110 | 0,139 | 0,125 | 0,099 | 0,121 | 0,020 |
| 115 | 0,150 | 0,270 | 0,149 | 0,190 | 0,070 |
| 120 | 0,125 | 0,154 | 0,144 | 0,141 | 0,015 |
| 125 | 0,121 | 0,137 | 0,041 | 0,100 | 0,051 |

ANEXO 20 Densidad radical (cm cm^{-3}), del muestreo del 28 de octubre con sus tres repeticiones para el tratamiento de $220 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$

| Profundidad (cm) | Lv (cm cm^{-3}) | | | Promedio | DS |
|---------------------|----------------------------|--------|--------|----------|-------|
| | I | II | III | | |
| 5 | 11,985 | 15,046 | 13,516 | 13,516 | 1,530 |
| 10 | 7,677 | 7,644 | 7,660 | 7,660 | 0,017 |
| 15 | 4,526 | 4,221 | 4,373 | 4,373 | 0,152 |
| 20 | 2,019 | 2,293 | 2,156 | 2,156 | 0,137 |
| 25 | 1,677 | 2,048 | 1,863 | 1,863 | 0,186 |
| 30 | 1,097 | 2,219 | 1,658 | 1,658 | 0,561 |
| 35 | 0,977 | 1,773 | 1,375 | 1,375 | 0,398 |
| 40 | 1,010 | 2,157 | 1,584 | 1,584 | 0,574 |
| 45 | 1,003 | 1,307 | 1,155 | 1,155 | 0,152 |
| 50 | 1,422 | 0,915 | 1,168 | 1,168 | 0,254 |
| 55 | 1,163 | 0,836 | 0,999 | 0,999 | 0,163 |
| 60 | 0,769 | 0,849 | 0,809 | 0,809 | 0,040 |
| 65 | 0,396 | 0,657 | 0,527 | 0,527 | 0,130 |
| 70 | 0,378 | 0,591 | 0,485 | 0,485 | 0,106 |
| 75 | 0,495 | 0,662 | 0,579 | 0,579 | 0,083 |
| 80 | 0,483 | 0,403 | 0,443 | 0,443 | 0,040 |
| 85 | 0,447 | 0,452 | 0,450 | 0,450 | 0,003 |
| 90 | 0,224 | 0,224 | 0,224 | 0,224 | 0,000 |
| 95 | 0,291 | 0,395 | 0,343 | 0,343 | 0,052 |
| 100 | 0,290 | 0,300 | 0,295 | 0,295 | 0,005 |
| 105 | 0,254 | 0,153 | 0,203 | 0,203 | 0,050 |
| 110 | 0,252 | 0,154 | 0,203 | 0,203 | 0,049 |
| 115 | 0,210 | 0,286 | 0,248 | 0,248 | 0,038 |
| 120 | 0,204 | 0,257 | 0,230 | 0,230 | 0,026 |
| 125 | 0,162 | 0,173 | 0,168 | 0,168 | 0,005 |

ANEXO 21 Precipitación y temperatura mensual durante el periodo del ensayo.

| Mes | Nº Eventos | Precipitación promedio Mensual (mm) | Evaporación promedio Mensual (mm) | Agua almacenada en el suelo (mm) | Temperatura Media Mensual (°C) |
|-------------|-----------------------|--|--|---|---|
| Abr | 8 | 188,9 | 44 | 128 | 12,35 |
| May | 11 | 262,3 | 24 | 174 | 9,95 |
| Jun | 19 | 472,9 | 16 | 228 | 8,25 |
| Jul | 14 | 347,7 | 19 | 196 | 7,85 |
| Ago | 12 | 279,1 | 31 | 176 | 8,5 |
| Sep | 7 | 153,5 | 51 | 139 | 9,75 |
| Octu | 5 | 123,0 | 80 | 124 | 11,85 |
| Nov | 4 | 100,8 | 105 | 109 | 13,35 |
| Dic | 3 | 60,0 | 134 | 68 | 15,4 |
| Ene | 2 | 39,5 | 142 | 26 | 17,15 |
| Feb | 3 | 59,3 | 107 | 28 | 16,85 |
| Mar | 4 | 85,7 | 80 | 47 | 14,95 |