

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**EVALUACIÓN DE BIOCARBÓN CON BACTERIAS PROMOTORAS DEL  
CRECIMIENTO (PGPR) SOBRE EL CULTIVO DE POROTO VERDE (*Phaseolus  
vulgaris L.*) A NIVEL DE CAMPO**

**POR**

**SOFÍA IGNACIA FUENTES RAMÍREZ**

**MEMORIA PRESENTADA A LA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN-CHILE  
2023**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EVALUACIÓN DE BIOCARBÓN CON BACTERIAS PROMOTORAS DEL  
CRECIMIENTO (PGPR) SOBRE EL CULTIVO DE POROTO VERDE (*Phaseolus  
vulgaris L.*) A NIVEL DE CAMPO**

**POR**

**SOFÍA IGNACIA FUENTES RAMÍREZ**

**MEMORIA PRESENTADA A LA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN-CHILE  
2023**

Aprobada por:

Profesor Asociado, Cristina Muñoz V.  
Ing. Agrónomo, Dr. Cs.

---

Guía

Kianyon Tay N.  
Ing. Agrónomo  
INIA Quilamapu.

---

Asesor externo

Profesor Asociado, Arturo Calderón O.  
Ing. Agrónomo, Ph. D.

---

Asesor

Profesor Titular, Erick Zagal V.  
Ing. Agrónomo, Dr. D.

---

Asesor

Profesor Asociado, Guillermo Wells M.  
Ing. Agrónomo, Mg. Cs

---

Decano

**TABLA DE CONTENIDOS**

	<b>Página</b>
Resumen.....	1
Summary.....	1
Introducción.....	2
Materiales y Métodos.....	5
Resultados y Discusión.....	11
Conclusiones.....	21
Referencias.....	21
Anexos.....	27

## INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

		<b>Página</b>
Figura 1	Rendimiento de poroto verde según tratamiento aplicado en 3 suelos de contrastante humedad aprovechable en 2 ensayos de riego, a) RT y b) RD.....	15
Figura 2	Rendimiento según tratamiento aplicado en dos suelos de contrastante humedad aprovechable, Regular (a) y Pobre (b), en dos dosis de biocarbon y bioproducto.....	20
Tabla 1	Caracterización química biocarbón de aserrín de pino (BP) y biocarbón de cama de ave (BA).....	6
Tabla 2	Descripción de biocarbón de aserrín de pino (BP) y cama de ave (BA).....	7
Tabla 3	Descripción general de sitios de estudio y sus ubicaciones..	8
Tabla 4	Descripción detallada de suelos de contrastante humedad aprovechable.....	9
Tabla 5	Análisis químico de los suelos y los principales parámetros a considerar en la fertilización.....	10
Tabla 6	Peso fresco de la biomasa aérea por planta según tratamiento aplicado en 3 suelos de contrastante humedad aprovechable.....	13
Tabla 7	Número de vainas por planta según tratamiento aplicado en 3 suelos de contrastante humedad aprovechable.....	14
Tabla 8	Peso fresco por planta según tratamiento aplicado en 2 suelos de contrastante humedad aprovechable.....	18
Tabla 9	Número de vainas según tratamiento aplicado en 2 suelos de contrastante humedad aprovechable.....	19

## **EVALUACIÓN DE BIOCARBÓN CON BACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO (PGPR) SOBRE EL CULTIVO DE POROTO VERDE (*Phaseolus vulgaris* L.) A NIVEL DE CAMPO**

EVALUATION OF BIOCHAR WITH GROWTH-PROMOTING BACTERIA (PGPR) ON THE GREEN BEAN (*Phaseolus vulgaris* L.) CULTIVATION AT THE FIELD LEVEL

**Palabras índice adicionales:** Humedad aprovechable, restricción de agua de riego, biomasa aérea, rendimiento.

### **RESUMEN**

El déficit hídrico es una problemática acelerada por el cambio climático que afecta gravemente la productividad agrícola. Se buscan estrategias que permitan a los cultivos adaptarse a estos nuevos escenarios. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto del biocarbón inoculado con bacterias promotoras del crecimiento sobre el cultivo del poroto verde a nivel de campo. Se utilizaron 2 tipos de biocarbón, siendo de cama de ave (BA) y de aserrín de pino (BP) en dos ensayos independientes. El Ensayo 1 permitió la evaluación de parámetros productivos del poroto verde bajo dos niveles de riego evaluados en forma independiente, con riego total (RT) y riego deficitario (RD); y el Ensayo 2 permitió la evaluación de parámetros productivos del poroto verde en condición RD bajo diferentes dosis. Sitios de estudio de contrastante humedad aprovechable (HA) (regular, pobre y muy pobre) fueron considerados. La aplicación de biocarbón de cama de ave con inoculación de bacterias *Bacillus* sp. cepa T45 incrementó la productividad del poroto verde bajo condición de riego total, sin efecto cuando el riego está restringido. Para riego deficitario el biocarbón con aserrín de pino con y sin inoculación tuvo los mejores resultados. Fue evidenciado el efecto de la dosis de aplicación de biocarbón con y sin inoculación sobre la productividad del cultivo y la humedad aprovechable del suelo fue determinante sobre los efectos de los biocarbones con inóculo microbiano.

### **Summary**

The water deficit is a problem accelerated by climate change that seriously affects agricultural productivity. Strategies are pursued that allow crops to adapt to these

new scenarios. The study aimed to evaluate the effect of biochar inoculated with growth-promoting bacteria on the green bean crop at the field level. Two types of biochar were used, bird litter (BB) and pine sawdust (BP) in two independent trials. Trial 1 allowed the evaluation of the productive parameters of the green bean under two levels of irrigation evaluated independently, with total irrigation (TI) and deficit irrigation (DI), and Trial 2 allowed the evaluation of productive parameters of the green bean in DI condition under different doses. Usable moisture (HA) contrast study sites (regular, poor and very poor) were considered. The application of biochar from poultry litter with inoculation of *Bacillus sp.* Strain T45 increased green bean productivity under full irrigation conditions, with no effect when irrigation is restricted. On behave of deficit irrigation, biochar with pine sawdust with and without inoculation had the best results. The effects of the application dose of biochar with and without inoculation on crop productivity were evidenced, and the moisture retention capacity of the soil was determined on the effects of biochar with microbial inoculum.

## **INTRODUCCIÓN**

Una de las grandes problemáticas que afectan actualmente a la agricultura es el déficit hídrico. Cambios en la cantidad, intensidad y frecuencia de lluvias afectan el medio ambiente y la sociedad. Lluvias moderadas constantes penetran en el suelo y benefician a las plantas, mientras que las mismas cantidades de lluvia en un corto período de tiempo puede causar inundaciones locales y escorrentía, generando daño a los cultivos y al suelo (Trenberth, 2011).

El reporte anual de la evolución del clima en Chile para el año 2018, estableció reducciones en las precipitaciones en la zona central y sur de Chile entre los años 1961 y 2017, con tendencias de disminución de 23 mm década<sup>-1</sup> en promedio (Anexo 1; Cortés, 2018). La sequía afecta el potencial hídrico y la turgencia de la planta, lo suficiente como para interferir con sus funciones normales (Hsiao, 2000) provocando negativos cambios fisiológicos y morfológicos en las plantas (Rahdari y Hoseini, 2012).

Las rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR por su sigla en inglés) podrían desempeñar un papel importante en el alivio del estrés por sequía actuando de diversas maneras. Estos microorganismos beneficiosos colonizan la

rizósfera / endo-rizósfera de las plantas e imparten tolerancia a la sequía produciendo distintas sustancias como exopolisacáridos (EPS) el cuál contiene complejos de carbohidratos de alto peso molecular (complejo lipopolisacárido-proteína y complejo polisacárido-lípido) responsables de la protección en condiciones extremas como la desecación. Los EPS proporcionan un microambiente que retiene el agua y se seca más lentamente que el entorno circundante, protegiendo así las bacterias y las raíces de las plantas contra la desecación (Hepper, 1975). Por otro lado, las rizobacterias pueden producir ACC desaminasa que degrada las moléculas de 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC) el cuál es precursor inmediato de la hormona etileno que en condiciones de estrés regula endógenamente la homeostasis de la planta, lo que reduce el crecimiento de raíces y brotes (Glick, 2005). Además, al eliminar el ACC se reduce el efecto nocivo del etileno, mejorando la condición de escape al estrés y se promueve el crecimiento de las plantas (Glick y Pasternak, 2003; Glick, 2005).

Otro beneficio de las bacterias PGPR es que pueden promover indirectamente el crecimiento vegetal a través del control biológico de patógenos y plagas por medio de la síntesis de antibióticos y toxinas, induciendo la resistencia sistémica en las plantas y compitiendo por nutrientes con patógenos presentes en la rizósfera (Sarabia *et al.*, 2010).

Las bacterias PGPR son efectivos sólo cuando se le proporcionan condiciones favorables para su crecimiento ya que son fuertemente afectados por factores abióticos como la humedad del suelo, la temperatura, el pH, la textura, el oxígeno y la disponibilidad de nutrientes (Knights *et al*, 2021). La eficiencia de bacterias PGPR depende del establecimiento de una densidad de población efectiva de células activas en la rizósfera vegetal. Es por ello que suspensiones bacterianas se preparan a densidades de  $1 \times 10^8$  a  $1 \times 10^9$  UFC mL<sup>-1</sup> para la inmersión de la raíz y la inoculación del suelo. Después de la inoculación a estas altas densidades, los números de células sufrirán una disminución rápida dependiendo de si el suelo ha sido esterilizado o no. En suelos que han sido esterilizados por método de autoclave, los inoculantes generalmente persistirán en densidades celulares de  $1 \times 10^7$  a  $1 \times 10^8$  UFC<sup>-1</sup> suelo por muchas semanas. En suelos no estériles las

poblaciones bacterianas disminuirán rápidamente hasta que la población alcance el equilibrio con su entorno (Martínez-Viveros *et al.*, 2010).

El estado fisiológico de las cepas bacterianas también influye en la supervivencia. Es así que cuando el inóculo se produce con bacterias obtenidas en aislamientos que se encuentren en la primera semana de crecimiento, éstas tienen mayor oportunidad de establecerse y sobrevivir en la rizósfera, comparadas con aquellas que se obtienen de aislamientos que tienen más de cinco semanas (Vandenhove *et al.*, 1993).

Actualmente las poblaciones PGPR más exitosas comercialmente han sido las bacterias formadoras de esporas Gram (+) que pueden persistir en el almacenamiento desde meses a años, ya que pueden resistir mejor las altas temperaturas, variaciones de la humedad y otras tensiones ambientales en comparación a las bacterias no formadoras de esporas (Martínez-Viveros *et al.*, 2010).

En la búsqueda de mejorar la adaptación y el desarrollo de las bacterias PGPR a nivel de campo, se ha investigado el uso del biocarbón como un bioproducto agrícola basado en la unión de bacterias rizosféricas añadidas a una matriz que provea mejores condiciones en el suelo (Hale, 2014; Ijaz *et al.*, 2019).

El biocarbón es un material orgánico rico en carbono derivado de la pirólisis de biomasa en condiciones de alta temperatura y bajo contenido de oxígeno (García *et al.*, 2016). Este se puede utilizar en una gran cantidad de aplicaciones, que van desde la producción de calor y energía hasta como enmienda en el suelo; siendo que sus propiedades dependerán del tipo de biomasa usada como materia prima y las condiciones del proceso de pirólisis (Weber y Quicker, 2018).

Se ha demostrado que algunas enmiendas basadas en biocarbón son efectivas para el mejoramiento de las propiedades químicas del suelo, aumentando la retención de nutrientes lo que conlleva a un incremento del crecimiento de las plantas (Bonanomi *et al.*, 2017). Diversos estudios se enfocan en determinar los cambios en las propiedades de los suelos con el uso de las enmiendas de biocarbón, indicando que generan un impacto en diversas propiedades químicas y biológicas del suelo, tales como un aumento en el pH del suelo y el carbono orgánico

(Muñoz *et al.*, 2019). Se ha detectado también aumentos en la conductividad eléctrica, nitrógeno total, fósforo disponible y en la capacidad de intercambio catiónico (Muñoz *et al.*, 2019; Ginebra, 2021; Dume *et al.*, 2016); además se ha descrito la disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero, como el CO<sub>2</sub>, en suelos volcánicos y no volcánicos de la región del Maule, Ñuble y la Araucanía (Muñoz *et al.*, 2019).

Las características químicas y físicas de biocarbón, tales como alta porosidad, capacidad de absorción y su capacidad de retención de agua, podrían crear hábitats adecuados para los microorganismos y la promoción de sus actividades (Thies y Rillig, 2009). Existe evidencia de que el biocarbón en el suelo tiene efectos significativos sobre las comunidades microbianas; según lo revisado recientemente por Lehmann *et al.* (2011) en la mayoría de los estudios evaluados, la biomasa microbiana aumentó en los suelos modificados con biocarbón. Cabe resaltar que gracias a la estructura porosa del biocarbón se sugiere una mayor retención de agua en el suelo, pudiendo mejorar así la adaptación de cultivos al cambio climático (Wang *et al.*, 2019). Es por ello que se propuso realizar una investigación cuyo objetivo principal fue determinar el efecto del biocarbón inoculado con bacterias PGPR sobre un cultivo a nivel de campo, considerando los siguientes objetivos específicos: i) determinar el efecto del biocarbón inoculado con PGPR sobre parámetros productivos en el poroto verde en suelos contrastantes respecto a su nivel de humedad aprovechable bajo dos condiciones de disponibilidad hídrica y ii) evaluar el efecto de diferentes dosis de biocarbón y sus bioproductos sobre parámetros productivos del poroto verde bajo condiciones restrictivas de disponibilidad de agua de riego.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Obtención de materias primas**

**Producción de biocarbón.** Los residuos de aves fueron colectados desde el plantel avícola de la Universidad de Concepción, en la estación experimental El Alazán. Se utilizó como materia prima los desechos acumulados en un pozo al aire libre, que consistía en guano de ave, restos de huevos y aves muertas.

Los residuos de pino fueron recolectados de un aserradero local, donde se usó como materia prima aserrín. El material fue deshidratado a temperatura ambiente y en horno a 60 °C, hasta alcanzar un máximo de humedad de 20%, que corresponde a la humedad máxima que permite el proceso de pirólisis. Este proceso, se realizó en un horno de pirólisis de elaboración local, por medio de una pirólisis lenta obteniéndose biocarbón a 500 °C. El tiempo de permanencia a máxima temperatura es de una hora con un rendimiento de 82% de producción de biocarbón. El biocarbón fue tamizado a 2 mm. La descripción química de los biocarbones utilizados en el estudio se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización química biocarbón de aserrín de pino (BP) y biocarbón de cama de ave (BA).

Parámetros	Propiedades de biocarbones	
	BP	BA
pH	5,73	10,24
N total (g kg <sup>-1</sup> )	2,8	8,4
C total (g kg <sup>-1</sup> )	841,5	116,1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	0,38	9,4
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	0,55	5,79
K dis (g kg <sup>-1</sup> )	0,32	14,78
P dis (g kg <sup>-1</sup> )	1,58	22,19

N total: Nitrógeno total; C total: Carbono total; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Nitrato; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>: Amonio; K dis: Potasio disponible; P dis: Fósforo disponible.

**Inoculación de biocarbón con bacterias PGPR.** La cepa utilizada fue *Bacillus* sp. cepa T45, la que fue seleccionada por los efectos positivos en el desarrollo de raíces y en la tasa de crecimiento de diversos cultivos aplicada en forma de suspensión microbiana (Sepúlveda, 2015). La cepa bacteriana fue reactivada desde la colección de microorganismos del Laboratorio de Microbiología de la Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción la que se mantenía a -80 °C. La reactivación se realizó mediante cultivo en agar nutritivo estándar (Difco, France) mediante siembra en estrías. Una vez desarrolladas las colonias, se inoculó un matraz con caldo nutritivo

estándar (Difco, France) en agitación constante a 25 °C por 33 h para la multiplicación de las bacterias.

Se inoculó biocarbón de aserrín de pino (BP) y de camas de aves (BA) con un 3 % de caldo nutritivo con bacterias a una concentración de  $1 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup> y se completó con solución salina (NaCl 0,89 %) estéril (Glodowska, 2014) para obtener una humedad del 40%, humedad a la cual se observó una mayor población de la cepa (Lagos, 2019). Se dejó reposar por 48 h a temperatura ambiente con el fin de permitir una óptima colonización del sustrato.

Se establecieron 5 tratamientos los cuales están identificados en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de los tratamientos.

Tratamiento	Identificación	Dosis (g planta <sup>-1</sup> )
<b>Control absoluto</b>	Control	-
<b>Biocarbón de aserrín de pino</b>	BP	2,5 (Ensayo 1) 2,5 y 5 (Ensayo 2)
<b>Biocarbón de aserrín de pino inoculado con <i>Bacillus</i> sp. cepa T45</b>	BP + T45	2,5 (Ensayo 1) 2,5 y 5 (Ensayo 2)
<b>Biocarbón de cama de aves</b>	BA	2,5 (Ensayo 1) 2,5 y 5 (Ensayo 2)
<b>Biocarbón de cama de aves inoculado con <i>Bacillus</i> sp. cepa T45</b>	BA + T45	2,5 (Ensayo 1) 2,5 y 5 (Ensayo 2)

**Desinfección de semillas.** Para el estudio se seleccionaron semillas de poroto verde (*Phaseolus vulgaris* L.) las que fueron desinfectadas mediante suspensión en alcohol 70° durante 60 segundos, luego en hipoclorito de sodio al 1% durante 3 minutos y nuevamente en alcohol al 70° durante 60 segundos, para finalizar se realizaron 3 lavados con agua destilada.

**Ensayo 1.** Este ensayo permitió evaluar los parámetros productivos del poroto verde bajo los tratamientos bajo 2 niveles de riego en forma independiente. El ensayo se realizó en 3 campos de pequeños productores de hortalizas de los

sectores de Oro Verde, Pelehue y Quinchamalí (Tabla 3), todos ubicados en la comuna de Chillán, región de Ñuble.

Tabla 3. Descripción general de sitios de estudio y sus ubicaciones.

Descripción	Sitios de estudio		
	Oro Verde	Pelehue	Quinchamalí
<b>Clasificación taxonómica</b>	Fine, halloysitic, mesic, Aquic Palexeralfs	Fine, mixed, active, thermic Duric Argixerolls	Fine, kaolinitic, mesic, Ultic Palexeralfs
<b>Serie de suelo</b>	Mirador	Bulnes	San Esteban
<b>Pendiente</b>	Ligeramente inclinada	Ligeramente inclinada	Ligeramente inclinada
<b>Coordenadas</b>	36°35'56.6"S 72°10'55.5 "W	36°37'32.1"S 72°17'48.7"W	36°38'31.3"S 72°24'19,6"W

De forma preliminar se realizó una caracterización química (Sadzawka *et al.*, 2006) y física de los suelos (Sandoval *et al.*, 2012) de los sitios de estudio y se determinó que los suelos tenían diferente humedad aprovechable, por ello se clasificaron según este criterio siendo los sitios Oro Verde, Pelehue y Quinchamalí clasificado como regular, pobre y muy pobre respectivamente según lo descrito en SAG (2011) (Tabla 4).

El cultivo hortícola evaluado fue poroto verde (*Phaseolus vulgaris L.*) variedad Magnum, el establecimiento fue al aire libre y con riego por surco. Se establecieron 8 hileras de 17,5 m de largo, con una separación de 70 cm entre hileras y 10 cm entre semillas, usando la densidad de siembra tradicional de los productores considerados en el estudio.

Con el fin de evitar la interacción entre tratamientos se dejó un espaciamiento de 60 cm entre ellos; además se establecieron hileras de barrera en los extremos y 2 hileras internas, para separar tratamientos de riego.

Los suelos en este estudio poseen un pH de medio a bajo, un nivel medio a bajo de nitrógeno disponible, fósforo de medio a alto, materia orgánica media a baja y un alto nivel de potasio (Tabla 5); por lo que la fertilización se realizó usando la mezcla

NPK 9- 41-12 de Soquimich y Urea de Copeval. En Oro Verde se fertilizó con 0,4 kg de mezcla y 1,3 kg de urea, y en Pelehue y Quinchamalí con 1,1 y 1,8 kg de urea. La superficie utilizada en el ensayo fue de 110 m<sup>2</sup> aprox. La dosis se calculó según análisis químico de cada uno de los suelos (Tabla 5).

Tabla 4. Caracterización física de los suelos clasificados de acuerdo a su nivel de humedad aprovechable.

Tipo de análisis	Suelos		
	Regular	Pobre	Muy pobre
<b>Textura</b>	Franco	Franco arcilloso	Franco
<b>Da (g/cc)</b>	1,15	1,33	1,17
<b>Dr (g/cc)</b>	2,55	2,66	2,57
<b>CC (%)</b>	36,24	26,15	14,26
<b>PMP (%)</b>	19,93	14,38	7,65
<b>Porosidad total (%)</b>	54,90	50,00	54,47
<b>HA (cm)</b>	11,25	9,39	4,64

Da: Densidad aparente; Dr: Densidad real; CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchites permanente; HA: Humedad aprovechable.

**Riego.** En cada sitio de estudio se consideraron 2 ensayos independientes de riego, uno de riego total (RT) y otro de riego deficitario (RD), que significó un ahorro aproximado del 20% del agua suministrada. De los 6 riegos realizados (de pre siembra hasta 5 días antes de la madurez comercial), el cuarto riego no se realizó en el ensayo RD, con el fin de simular la falta de agua en el periodo crítico de inicio de formación de vaina. El método de riego utilizado fue por surco de un ancho de 40 cm y un largo de 17,5 m.

La frecuencia de riego se ajustó de acuerdo a las condiciones edafoclimáticas del sector y los estados fenológicos del cultivo, cambios en la vegetación y su grado de cobertura del suelo. Evapotranspiración, precipitación acumulada y temperatura del aire del periodo de establecimiento del cultivo pueden observarse en Anexo 5.

La frecuencia de riego considerada para su etapa inicial fue de 25 días, para la etapa de desarrollo fue de 10 días, y para la etapa final 11 días.

Tabla 5. Análisis químico de los suelos y los principales parámetros a considerar en la fertilización.

<b>Suelos con contrastantes HA</b>			
<b>Tipo de análisis</b>	<b>Regular</b>	<b>Pobre</b>	<b>Muy Pobre</b>
<b>pH en agua</b>	5,99	6,13	6,81
<b>Materia Orgánica (%)</b>	7,24	2,86	1
<b>Nitrógeno Disponible (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	22,8	12,3	5,9
<b>Fósforo Olsen (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	16,6	25,8	43,0
<b>K Intercambiable (cmol kg<sup>-1</sup>)</b>	0,98	1,21	0,61

El criterio o umbral de riego utilizado fue cuando el 50% del agua aplicada haya sido evapotranspirada (datos de evapotranspiración obtenidos de estación meteorológica Nueva Aldea INIA). Con el fin de corroborar la humedad de los suelos, se midió ocupando sensores WATERMARK® Modelo 200SS ubicados a 15 cm y 45 cm de profundidad, que fueron comprobados un día antes y 2 horas después de cada riego. Las lecturas se pueden observar en el Anexo 2, 3 y 4.

Para obtener el tiempo de riego se calculó la velocidad de infiltración del agua en el surco mediante el método de los 2 puntos, obteniendo en promedio, 50 mm de altura de agua infiltrada estando en un punto del surco un tiempo de 1 hora aproximadamente.

**Ensayo 2.** Este ensayo se estableció para determinar el efecto de la dosis de aplicación sobre los parámetros productivos del cultivo en dos de los tres sitios evaluados del Ensayo 1, siendo seleccionados los sitios Oro Verde y Pelehue que representan a los suelos de HA regular y pobre solamente bajo la condición restrictiva de riego (RD). Para ello, se adicionaron parcelas experimentales en forma paralela al Ensayo 1 con los mismos tratamientos, pero con la dosis adicional de 5

g planta<sup>-1</sup>. Los manejos agronómicos del cultivo fueron iguales a los indicados para el Ensayo 1.

**Medición de parámetros productivos.** Tanto para los Ensayos 1 y 2 se realizó la cosecha cuando la vaina de poroto verde cuando alcanzó madurez comercial, siendo el largo de vaina de 10-15 cm y semillas poco desarrolladas. Para la cosecha se consideró el 50% de las plantas por tratamiento (5 plantas por tratamiento en cada repetición) y para determinar la partición de biomasa se cosecharon 2 plantas adicionales por repetición. De las plantas cosechadas se determinó:

- 1) Partición de biomasa aérea fresca. Se obtuvo el peso fresco total de la planta, se midió la altura de la planta y se contó el número de vainas.
- 2) Rendimiento. Se cosecharon todas las vainas de las plantas, realizándose 3 cosechas en total, obteniéndose el peso fresco de vainas por planta y extrapolándose a un metro cuadrado.

**Diseño experimental.** Se establecieron 2 ensayos, el primero se realizó en 3 sitios de estudio (regular, pobre y muy pobre) estableciendo en cada uno de ellos 2 ensayos de riego independientes (RT y RD), los cuales fueron analizados por separado. El Ensayo 2 se realizó en 2 sitios de estudio (regular y pobre) bajo condiciones restrictivas de riego (RD). En ambos ensayos y en ambas condiciones de riego se consideraron los 5 tratamientos con 4 repeticiones cada uno. En ambos ensayos las unidades experimentales fueron distribuidas en un diseño de bloques completos al azar. El análisis estadístico de datos se realizó a través del análisis de varianza (ANOVA) para determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas ( $P \leq 0,05$ ) entre tratamientos, previa comprobación de supuestos de normalidad y homogeneidad de la varianza de datos. Los supuestos del análisis de varianza se sometieron al test de Shapiro-Wilks modificado para la normalidad y Levene para la homogeneidad de varianza, ambos con el 95% de significancia. La comparación de medias se efectuó mediante la prueba de contraste LSD Fisher a un nivel de 95%. Todas las pruebas estadísticas fueron realizadas con el software estadístico Infostat versión actualizada día: 30-04-2020 (Balzarini *et al.*, 2008).

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Ensayo 1.** Para la evaluación de parámetros productivos del poroto verde se determinó la biomasa aérea fresca, número de vainas y rendimiento. Los resultados indican lo siguiente:

**a) Peso fresco de planta.** En la Tabla 6 se puede observar las diferencias significativas en RT en suelos de HA pobre y muy pobre, siendo este último el que presentó un mayor peso fresco por planta (promedio de 378,61 g). El tratamiento BA+ T45 presentó el mayor peso en el suelo de HA pobre (44,4% mayor que control), mientras que en el suelo de HA muy pobre se presentó un mayor peso en el tratamiento BA (29,8% mayor que control).

En RD se observaron diferencias significativas en los suelos de HA pobre y muy pobre, siendo este último el que presentó un mayor peso fresco por planta (promedio de 319,9 g). Tanto en los suelos de HA pobre y muy pobre, el tratamiento con mayor peso fresco fue BP, con 29,2% y 27,8% superior al control respectivamente.

**b) Número de vainas.** En la Tabla 7 se puede observar que en RT hubo diferencias significativas en los suelos de HA pobre y muy pobre, siendo este último el que presentó un mayor número de vainas por planta (22,73 unidades). Los suelos con HA pobre y muy pobre presentaron mejores resultados con el tratamiento BA+ T45 (135,1% y 22,1% mayor que control, respectivamente).

En RD se presentaron diferencias significativas en los suelos de HA pobre y muy pobre, siendo este último el que presentó un mayor número de vainas por planta (12 unidades). En el suelo de HA pobre el tratamiento con mayor número de vainas fue BP y BP + T45 (siendo 2 veces superior al control), mientras que en el suelo de HA muy pobre fue el tratamiento BP (45,2% mayor a control).

**c) Rendimiento.** Se determinaron diferencias significativas en el rendimiento del cultivo de poroto para la condición de RT en los suelos de HA pobre y muy pobre (Figura 1a), siendo este último el que presentó mejores rendimientos. En el suelo de HA pobre se observó mayor rendimiento en BA+T45 (98,4% mayor a control) y en suelo de HA muy pobre el tratamiento que obtuvo mayor rendimiento fue BA (42,1% mayor a control).

En RD se obtuvieron diferencias significativas en los 3 suelos contrastantes (Figura 1b), siendo el suelo de HA muy pobre el que presentó mayor rendimiento comparado a los otros dos suelos. Los suelos catalogados como regular y muy pobre obtuvieron mayores rendimientos en tratamiento BP (31,4% y 61,1 % mayores al control, respectivamente) y suelo de HA pobre en BP + T45 (67,4% mayor a control).

Tabla 6. Peso fresco de la biomasa aérea por planta según tratamiento aplicado en 3 suelos de contrastante humedad aprovechable.

<b>RT</b>			
<b>Tratamientos</b>	<b>Peso fresco por planta (g)</b>		
	<b>Regular</b>	<b>Pobre</b>	<b>Muy Pobre</b>
<b>Control</b>	220,90 ± 29,58 a	180,32 ± 24,37 c	333,16 ± 31,24 c
<b>BP</b>	195,72 ± 5,58 a	219,87 ± 10,89 b	369,01 ± 26,72 bc
<b>BP + T45</b>	195,26 ± 19,78 a	199,63 ± 14,63 bc	344,55 ± 56,28 c
<b>BA</b>	206,67 ± 58,02 a	195,27 ± 12,74 bc	432,29 ± 22,24 a
<b>BA+ T45</b>	219,07 ± 13,34 a	260,43 ± 7,55 a	414,04 ± 17,91ab
	$\bar{x}$ 207,52	$\bar{x}$ 211,10	$\bar{x}$ 378,61
<b>RD</b>			
<b>Tratamientos</b>	<b>Peso fresco por planta (g)</b>		
	<b>Regular</b>	<b>Pobre</b>	<b>Muy Pobre</b>
<b>Control</b>	272,16 ± 77,94 a	148,41 ± 7,60 cd	301,81 ± 20,38 bc
<b>BP</b>	228,85 ± 79,12 a	191,77 ± 3,86 a	385,81 ± 35,94 a
<b>BP + T45</b>	256,25 ± 28,20 a	161,68 ± 12,52 bc	342,27 ± 17,22 b
<b>BA</b>	195,36 ± 61,67 a	133,26 ± 3,58 d	271,48 ± 21,22 c
<b>BA + T45</b>	220,13 ± 56,07 a	171,82 ± 10,39 b	298,14 ± 27,15 c
	$\bar{x}$ 234,55	$\bar{x}$ 163,67	$\bar{x}$ 319,90

Letras distintas entre columnas representa diferencias significativas según prueba de DMS de Fisher ( $P \leq 0,05$ ).

En RT se observaron diferencias significativas en el rendimiento del cultivo, lo que indicaría que los tratamientos de biocarbón de residuos de cama de ave (BA) con y

sin bacterias PGPR podrían incrementar la disponibilidad de nutrientes en los suelos y/o incrementar el crecimiento de las raíces de las plantas. lo que facilitaría su capacidad de absorber nutrientes desde los suelos.

Tabla 7. Número de vainas por planta según tratamiento aplicado en 3 suelos de contrastante humedad aprovechable.

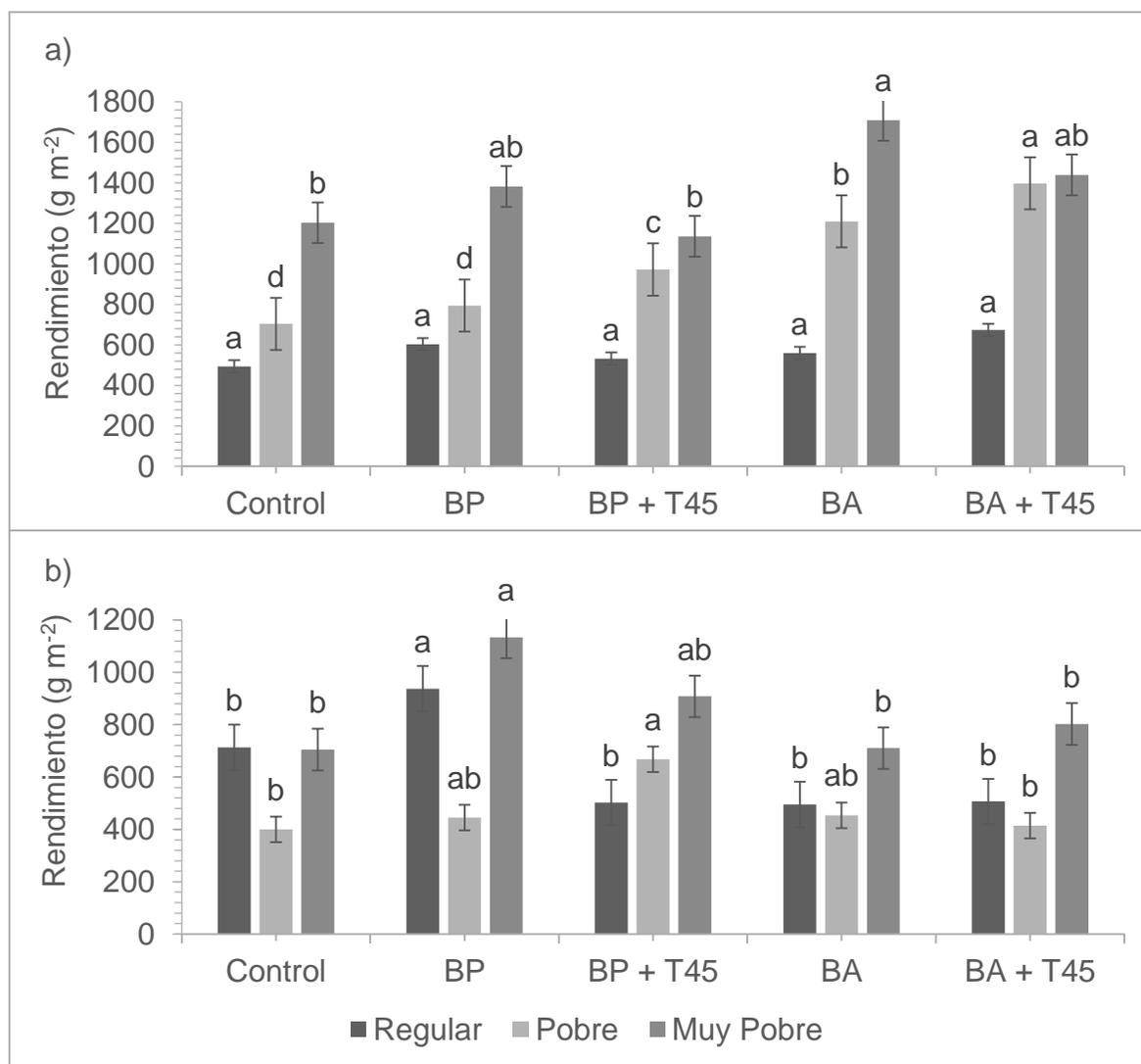
<b>RT</b>			
	<b>Número de vainas (unidades planta<sup>-1</sup>)</b>		
<b>Tratamientos</b>	<b>Regular</b>	<b>Pobre</b>	<b>Muy Pobre</b>
<b>Control</b>	7,33 ± 1,53 a	14,25 ± 3,86 c	22,67 ± 0,58 b
<b>BP</b>	8,67 ± 2,52 a	14,25 ± 2,06 c	21,33 ± 0,58 b
<b>BP + T45</b>	7,50 ± 2,29 a	14,75 ± 2,22 c	20,33 ± 1,53 b
<b>BA</b>	10,00 ± 2,00 a	23,25 ± 3,30 b	21,67 ± 2,52 b
<b>BA + T45</b>	8,83 ± 0,29 a	33,50 ± 5,92 a	27,67 ± 3,21 a
	$\bar{x}$ 8,47	$\bar{x}$ 20	$\bar{x}$ 22,73
<b>RD</b>			
	<b>Número de vainas (unidades planta<sup>-1</sup>)</b>		
<b>Tratamientos</b>	<b>Regular</b>	<b>Pobre</b>	<b>Muy Pobre</b>
<b>Control</b>	6,00 ± 1,15 ab	6,00 ± 0,82 bc	10,33 ± 2,52 b
<b>BP</b>	7,25 ± 1,50 a	11,25 ± 1,26 a	15,00 ± 2,65 a
<b>BP + T45</b>	5,00 ± 0,82 b	12,75 ± 2,22 a	13,67 ± 1,53 ab
<b>BA</b>	5,25 ± 0,96 b	4,75 ± 1,71 c	10,33 ± 1,15 b
<b>BA + T45</b>	3,00 ± 0,82 c	7,75 ± 0,50 b	10,67 ± 1,15 b
	$\bar{x}$ 5,3	$\bar{x}$ 8,5	$\bar{x}$ 12

Letras distintas entre columnas representa diferencias significativas según prueba de DMS de Fisher ( $P \leq 0,05$ ).

Cabe mencionar que los suelos clasificados como pobre y muy pobre presentaban menores contenidos de materia orgánica y nitrógeno total que el suelo de HA regular (Tabla 5); sin embargo, superaron el rendimiento obtenido por el suelo de HA regular (Figura 1a). El BA presenta relevantes diferencias en su composición química comparada al biocarbón de pino (BP; Tabla1), siendo los niveles de N total, amonio y nitrato, P y K disponible considerablemente mayores en BA, lo cual aportaría nutrientes al cultivo, incrementando su rendimiento tal como se observa en estos resultados. Adicionalmente, el probable incremento de pH del suelo ocasionado por la adición de BA que posee un pH de 10,24 (Tabla 1) permitiría indirectamente la

solubilización de fósforo y otros nutrientes del suelo (Puente *et al*, 2010; Mella y Khüne, 1985; Hashimoto *et al.*, 2012).

Figura 1. Rendimiento de poroto verde según tratamiento aplicado en 3 suelos de contrastante humedad aprovechable en 2 ensayos de riego, a) RT y b) RD.



Diferentes letras representan diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada nivel de humedad aprovechable según prueba de DMS de Fisher ( $P \leq 0,05$ ).

El efecto de la asociación biocarbón con PGPR se pudo observar en la condición de suelo de HA pobre, donde se obtuvo una mayor productividad en ambos tipos de biocarbón (BA+ T45 y en BP + T45) comparado a los productos sin PGPR; lo que indicaría que el efecto promotor del crecimiento radicular de las bacterias fue manifestado en el incremento del rendimiento de cosecha (Figura 1a) cuando no

hay restricciones de disponibilidad de agua de riego; lo que no fue evidente bajo la condición de riego deficitario (RD; Figura 1b). Probablemente esta diferencia ocurre debido a que el suelo de HA pobre es de textura franco-arcilloso, mientras que los otros dos suelos son de textura franca (Tabla 4); es en las arcillas que se ha descrito la capacidad protectora a la deshidratación de las bacterias, lo que aumenta su supervivencia y colonización (Bashan *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2011) al modificar las tasas de flujo de agua, permitiendo así su protección frente al secado y rehidratación (Cassidy *et al.*, 1996). Este proceso proporcionaría una liberación gradual y prolongada de humedad en el suelo, por lo que, en comparación con los otros dos suelos estudiados, tendría mejores condiciones para el desempeño de la cepa bacteriana evaluada. La cepa T45 se destaca principalmente por su capacidad de solubilizar fósforo y producción de ácido indol acético (AIA), ambos atributos favorecen un mejor desarrollo del cultivo, tanto al hacer disponible el fósforo como nutriente y promover el crecimiento vegetal (Sepúlveda, 2015).

En RD se observaron diferencias significativas en número de vainas y rendimiento del cultivo del poroto verde en los 3 suelos de contrastante humedad aprovechable (regular, pobre y muy pobre), lo que indicaría que los tratamientos de biocarbón de aserrín de pino (BP) con y sin bacterias PGPR podrían estar proporcionando al cultivo, una mayor tolerancia al estrés hídrico provocado por la menor disponibilidad de agua de riego. Esta propiedad se atribuye a la elevada área superficial y volumen de poros de los biocarbones provenientes de residuos lignocelulósicos en comparación con otras materias primas (Ali *et al.*, 2022; Zhang y You, 2013).

En general, se ha comprobado que la asociación de cultivos con bacterias del género *Bacillus* permite aumentar la tolerancia al estrés hídrico por la actividad 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC deaminasa) que permite la reducción de los niveles del etileno producidos por las plantas ante condiciones de estrés (Glick, 2014; Sepúlveda-Caamaño *et al.*, 2018).

**Ensayo 2.** La evaluación del efecto de la dosis de los tratamientos sobre los parámetros productivos del poroto verde en condiciones de déficit hídrico permitió determinar lo siguiente:

**a) Peso fresco de planta.** En la Tabla 8 se puede observar que aplicando los tratamientos en dosis de 2,5 g planta<sup>-1</sup> no hubo diferencias significativas para el suelo de HA regular, mientras que en suelo de HA pobre sí hubo diferencia significativa. En tratamiento BP se obtuvo el mayor peso fresco de planta, siendo 29,2% mayor a control.

En la dosis de 5 g planta<sup>-1</sup> se vieron diferencias significativas solo en suelo de HA pobre, donde BP obtuvo el mayor peso fresco de planta siendo 37,5% mayor a control.

En los suelos de HA regular y pobre se obtuvieron diferencias significativas entre las 2 dosis, únicamente en el tratamiento BP, siendo 54,5% y 13,7 % mayor el peso fresco de la planta con la dosis mayor.

**b) Número de vainas.** En Tabla 9 se puede observar que en dosis de 2,5 g planta<sup>-1</sup> hubo diferencias significativas entre los tratamientos en los suelos de HA regular y pobre, siendo este último el que presentó un mayor número de vainas (8,5 unidades planta<sup>-1</sup>), especialmente los tratamientos BP y BP + T45 al ser 200% mayor a control.

En la dosis de 5 g planta<sup>-1</sup> se observaron diferencias significativas tanto en los suelos de HA regular y pobre, siendo el regular el que obtuvo mayor cantidad de vainas por planta (16,5 unidades), principalmente en el tratamiento BP (69,8% mayor a control). En suelo de HA regular se obtuvieron diferencias significativas entre ambas dosis en todos los tratamientos, donde el promedio de los tratamientos con biocarbón o biocarbón inoculado con PGPR significó un incremento del número de vainas por planta superior a 3 veces al obtenido con la dosis menor (2,5 g planta<sup>-1</sup>). En el caso del suelo con HA pobre se obtuvieron diferencias significativas entre las dosis en los tratamientos BP, BA y BA+T45, las cuales generaron 61% más de vainas por planta que la dosis menor.

**c) Rendimiento.** Como puede observarse en Figura 2, en la dosis de 2,5 g planta<sup>-1</sup> hubo diferencias significativas entre los tratamientos tanto en suelo de HA regular como en pobre, observándose que en ambos suelos el tratamiento con mayor rendimiento fue BP con 31,4% y 11,4% en comparación con sus respectivos controles.

Aplicando la dosis de 5 g planta<sup>-1</sup> se observaron diferencias significativas tanto en el suelo de HA regular como en pobre, siendo el suelo de HA regular el que presenta los mayores rendimientos, principalmente en el tratamiento BP siendo 60,9% mayor al control.

En cuanto a la comparación entre ambas dosis de aplicación, se obtuvo que en el suelo de HA regular hubo diferencias significativas entre ambas dosis en todos los tratamientos, sobresaliendo el tratamiento BP +T45 al ser la dosis de 5 g planta<sup>-1</sup> 2,7 veces superior en rendimiento a la dosis 2,5 g planta<sup>-1</sup>. En suelo de HA pobre se obtuvo diferencias significativas en el tratamiento BA+ T45 donde la dosis de 5 g planta<sup>-1</sup> fue un 55,5% mayor a la dosis menor.

Tabla 8. Peso fresco por planta (g) según tratamiento aplicado en diferentes dosis en suelos de contrastante humedad aprovechable.

Tratamientos	Regular			
	2,5 g planta <sup>-1</sup>		5 g planta <sup>-1</sup>	
<b>Control</b>	272,16 ± 77,94 a	A	268,64 ± 55,72 a	A
<b>BP</b>	228,85 ± 79,12 a	B	353,62 ± 50,36 a	A
<b>BP + T45</b>	256,25 ± 28,20 a	A	282,86 ± 38,50 a	A
<b>BA</b>	195,36 ± 61,67 a	A	301,42 ± 95,95 a	A
<b>BA + T45</b>	220,13 ± 56,07 a	A	304,77 ± 86,71 a	A
	$\bar{x}$ 234,55		$\bar{x}$ 302,26	
Tratamientos	Pobre			
	2,5 g planta <sup>-1</sup>		5 g planta <sup>-1</sup>	
<b>Control</b>	148,41 ± 7,60 cd	A	158,64 ± 23,06 b	A
<b>BP</b>	191,77 ± 3,86 a	B	218,13 ± 11,48 a	A
<b>BP + T45</b>	161,68 ± 12,52 bc	A	170,50 ± 29,29 b	A
<b>BA</b>	133,26 ± 3,58 d	A	158,29 ± 21,07 b	A
<b>BA + T45</b>	171,82 ± 10,39 b	A	182,61 ± 16,07 b	A
	$\bar{x}$ 163,67		$\bar{x}$ 177,63	

Letras distintas en minúscula indican diferencias estadísticas entre tratamientos según la dosis aplicada y letras distintas en mayúscula indica diferencia estadística entre dosis aplicada por tratamiento. Prueba de DMS de Fisher ( $P \leq 0,05$ ).

Al realizar la comparación entre ambas dosis, se destaca la productividad del suelo de HA regular por sobre el suelo de HA pobre en dosis de 5 g planta<sup>-1</sup>. Se observan diferencias significativas especialmente en número de vaina (3 veces superior a

dosis de 2,5 g planta<sup>-1</sup>) y rendimiento (2 veces superior a dosis de 2,5 g planta<sup>-1</sup>), principalmente en el tratamiento BP + T45.

El aumento de la dosis al doble incrementó la productividad del cultivo en condiciones restrictivas de disponibilidad de agua de riego, evitando mermas en la productividad de la planta (Zaheer *et al*, 2020; Ali *et al*, 2017; Yildirim *et al*, 2021). A su vez, el suelo de HA regular poseía mayor contenido de materia orgánica y nutrientes, lo que pudo favorecer una mayor productividad que el resto de los suelos (FAO, 2005).

Tabla 9. Número de vainas (unidades planta<sup>-1</sup>) según tratamiento aplicado en diferentes dosis en suelos de contrastante humedad aprovechable.

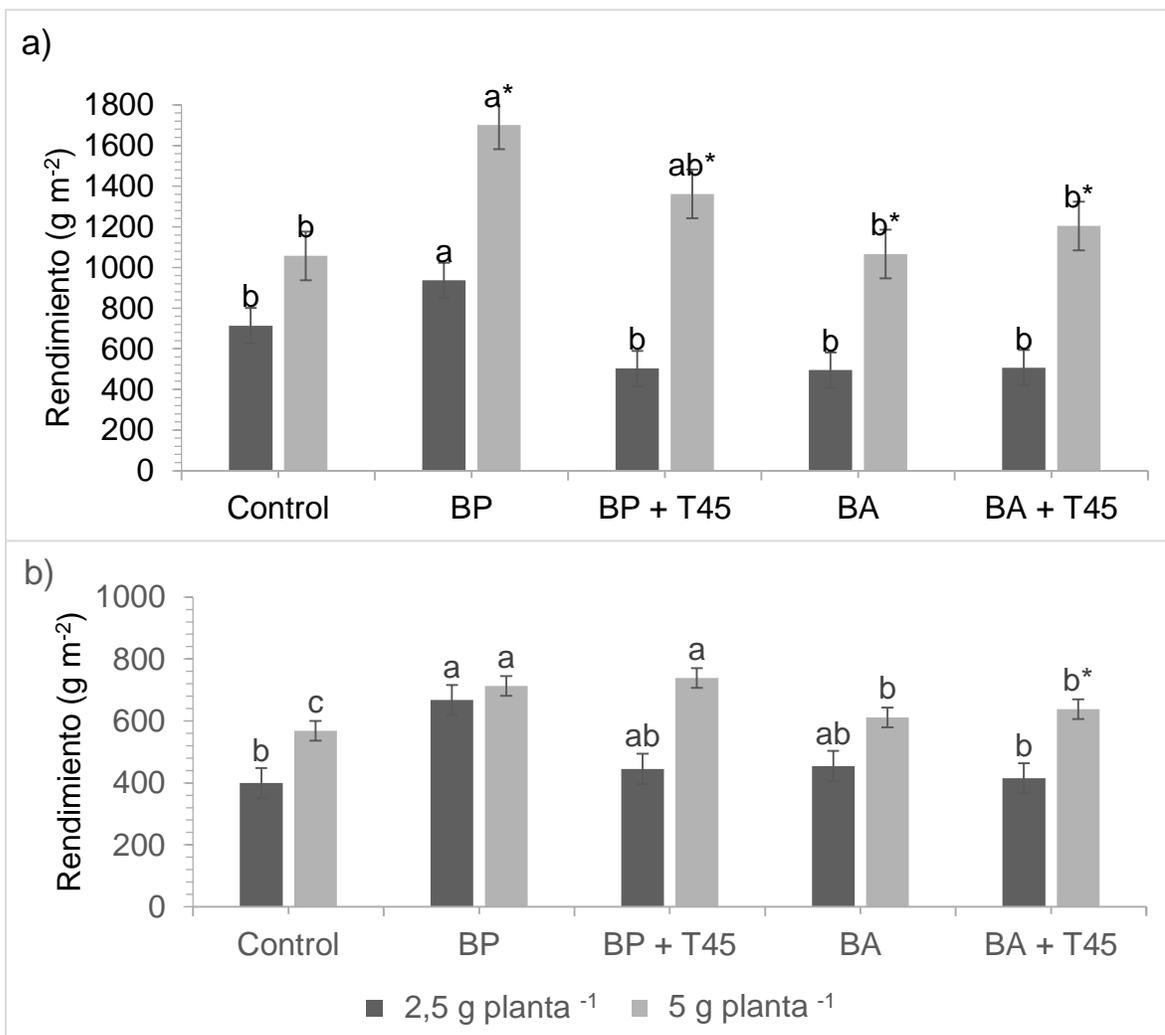
Tratamientos	Regular			
	2,5 g planta <sup>-1</sup>		5 g planta <sup>-1</sup>	
<b>Control</b>	5,67 ± 1,15 a	A	13,25 ± 4,91 b	A
<b>BP</b>	7,25 ± 1,50 a	B	22,50 ± 3,51 a	A
<b>BP + T45</b>	5,00 ± 1,00 ab	B	17,13 ± 1,44 ab	A
<b>BA</b>	5,00 ± 1,00 ab	B	13,50 ± 2,48 b	A
<b>BA + T45</b>	3,33 ± 0,58 b	B	16,13 ± 3,22 b	A
	$\bar{x}$ 5,38		$\bar{x}$ 16,50	
Tratamientos	Pobre			
	2,5 g planta <sup>-1</sup>		5 g planta <sup>-1</sup>	
<b>Control</b>	6,00 ± 0,82 bc	A	7,25 ± 0,96 c	A
<b>BP</b>	11,25 ± 1,26 a	B	19,50 ± 1,73 a	A
<b>BP + T45</b>	12,75 ± 2,22 a	A	12,25 ± 4,72 b	A
<b>BA</b>	4,75 ± 1,71 c	B	8,50 ± 2,08 bc	A
<b>BA + T45</b>	7,75 ± 0,50 b	B	10,63 ± 1,38 bc	A
	$\bar{x}$ 8,5		$\bar{x}$ 11,63	

Letras distintas en minúscula indican diferencias estadísticas entre tratamientos según la dosis aplicada y letras distintas en mayúscula indica diferencia estadística entre dosis aplicada por tratamiento. Prueba de DMS de Fisher ( $P \leq 0,05$ ).

Se ha estudiado el potencial del biocarbón como un medio adecuado para las bacterias, Glodowska (2014) evidencia que debido a las propiedades químicas y físicas del biocarbón, este puede aumentar la supervivencia de las PGPR. Glaser *et al.* (2002) recopiló información de diversos ensayos donde se realizaron enmiendas con biocarbón en diferentes cultivos, obteniéndose mayores rendimientos con mayor dosis de biocarbón. Galazka *et al.* (2019) evaluó el impacto

de las dosis de biocarbón en la calidad del suelo y la diversidad funcional microbiana, donde se evidenció un aumento significativo en la actividad biológica.

Figura 2. Rendimiento de poroto verde según tratamiento aplicado en diferentes dosis en suelos de contrastante humedad aprovechable, regular (a) y pobre (b).



Asterisco (\*) representa diferencias significativas entre dosis. Letras distintas representan diferencias significativas entre tratamientos según prueba de DMS de Fisher ( $P \leq 0,05$ ).

En éste estudio, el tratamiento BP + T45 destacó por sobre los otros tratamientos, incrementando la diferencia en productividad entre ambas dosis. No hay una dosis optima definida, ya que este dependerá del objetivo que tenga su adicción y de diversos factores, pero se ha demostrado, en diferentes dosis y formas de incorporación, que su uso es beneficioso, tanto para la planta como para el suelo

(Gale *et al.*, 2019; Pandit *et al.*, 2018; Curaqueo *et al.*, 2014). Por otro lado, la incorporación excesiva de biocarbón al suelo puede generar un aumento en el pH de este, pudiendo provocar disminuciones en el rendimiento de un cultivo al generar deficiencia de micronutrientes (Kishimoto y Sugiura, 1985), situación que no fue evidenciado en este estudio.

## CONCLUSIONES

1. Para la condición de riego total, la aplicación de biocarbón de cama de ave con inoculación de bacterias *Bacillus* sp. cepa T45 incrementó la productividad del cultivo de poroto verde para los suelos con pobre y muy pobre humedad aprovechable; sin embargo, bajo condición de riego deficitario no hubo efecto de la inoculación microbiana.
2. Para la condición de riego deficitario, la aplicación de biocarbón de aserrín de pino con y sin inoculación microbiana permitieron un mayor rendimiento del cultivo de poroto verde.
3. La dosis de 5 g planta<sup>-1</sup> de los biocarbones con y sin inoculación de bacterias aumentaron la productividad del cultivo de poroto verde en condiciones de restricción de agua de riego.
4. El efecto de la dosis de los productos varió dependiendo del tipo de suelo evaluado; destacando la productividad del cultivo en el suelo con regular humedad aprovechable a la mayor dosis de aplicación.

## REFERENCIAS

1. Ali, L., A. Palamanit, K. Techato, A. Ullah, M. Chowdhury and K. Phoungthong. 2022. Characteristics of Biochars Derived from the Pyrolysis and Co-Pyrolysis of Rubberwood Sawdust and Sewage Sludge for Further Applications. *Sustainability* 14: 3829.
2. Ali, S., M. Rizwan, M. Qayyum, Y. Ok, M. Ibrahim, M. Riaz, M. Arif, F. Hafeez, M. Al-Wabel and A. Shahzad. 2017. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: a critical review. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 24(14):12700-12712.
3. Balzarini, M., L. González, E. Tablada, F. Casanoves, J. Di Rienzo y C. Robledo.

2008. InfoStat software estadístico. Manual del usuario. Versión 2008. Brujas. Córdoba, Argentina.

4. Bashan, Y., J. Hernández, L. Leyva and M. Bacilio. 2002. Alginate microbeads as inoculant carriers for plant growth-promoting bacteria. *Biol. Fertil. Soils*. 35: 359-368.
5. Bonanomi, G., F. Ippolito, G. Cesarano, B. Nanni, N. Lombardi, A. Rita, A. Saracino and F. Scala. 2017. Biochar as plant growth promoter: Better off alone or mixed with organic amendments?. *Front. Plant Sci*. 8:1570.
6. Cassidy, M., H. Lee and J. Trevors. 1996. Environmental applications of immobilized microbial cells: a review. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol*. 16, 79-101.
7. Cortés, C. 2018. Megasequía, la historia continúa. Dirección Meteorológica de Chile. Recuperado de <https://blog.meteochile.gob.cl/2018/12/28/megasequia-la-historia-continua/>. [Consulta: 26 enero 2022].
8. Curaqueo, G., S. Meier, N. Khan, M. Cea y R. Navia. 2014. Uso de biocarbón en dos suelos volcánicos: efectos sobre las propiedades del suelo y el rendimiento de cebada. *R.C. Suelo Nutr. Veg*. 14 (4): 911-924.
9. Dume, B., T. Mosissa and A. Nebiyu. 2016. Effect of biochar on soil properties and lead (Pb) availability in a military camp in South West Ethiopia. *African J. Environ. Sci. Technol*. 10(3): 77-85.
10. Galazka, A., K. Jończyk, K. Gawryjolek y J. Ciepiel. 2019. El impacto de las dosis de biocarbón en la calidad del suelo y la diversidad funcional microbiana. *BioRes*. 14(4): 7852-7868.
11. Gale, N. and S. Thomas. 2019. Dose-dependence of growth and ecophysiological responses of plants to biochar. *Sci. Total. Environ*. 658: 1344-1354.
12. García, A., L. de Souza, M. Pereira, R. Castro, J. García-Mina, E. Zonta, F. Lisboa and R. Berbara. 2016. Structure-property-function relationship in humic substances to explain the biological activity in plants. *Sci. Rep*. 6(20798).
13. Ginebra, M. 2021. Análisis agronómico y ambiental del uso de biocarbón como enmendante de suelo. Tesis Doctorado. Universidad de Concepción, Chillán.

14. Glaser, B., Lehmann, J. and Zech, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal, a review. *Biol. Fertil. Soils*. 35: 219-230.
15. Glick, B. 2005. Modulation of plant ethylene levels by the bacterial enzyme ACC deaminase. *FEMS Microbiol. Lett.* pp. 251:1-7.
16. Glick, B. 2014. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiol. Res.* 169(1):30–9.
17. Glick, B. and J. Pasternak. 2003. *Molecular Biotechnology: Principles and Application Recombinant Dna Technology* (3rd ed.). ASM Press. Washington D.C., USA.
18. Glodowska, M. 2014. Biochar as a potential inoculant carrier for plant-beneficial bacteria. Master's thesis. McGill University, Quebec, Canada.
19. Hale, L. 2014. Biochar and Plant Growth Promoting Rhizobacteria as Soil Amendments. University of California, Riverside.
20. Hashimoto, Y., J. Kang and N. Matsuyama. 2012. Plant analysis of phosphorus retention capacity of allophanic and non allophanic Andisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76(2): 441-448.
21. Hepper, C. 1975. Extracellular polysaccharides of soil bacteria N. Walker (Ed.). *Soil Microbiology*. Wiley. pp. 93-111.
22. Hsiao, A. 2000. Effect of water deficit on morphological and physiological characterizes in Rice (*Oryza sativa*). *J. Agric.*, 3: 93-97.
23. Ijaz, M., M. Tahir, M. Shahid, S. Ul-Allah, A. Sattar, A. Sher, K. Mahmood and M. Hussain. 2019. Combined application of biochar and PGPR consortia for sustainable production of wheat under semiarid conditions with a reduced dose of synthetic fertilizer. *Braz. J. Microbiol.*, 50(2): 449–458.
24. Kishimoto, S. and G. Sugiura. 1985. Charcoal as a soil conditioner, in: *Symposium on Forest Products Research, International Achievements for the Future*. 5:12–23.
25. Knights, H., B. Jorin, T. Haskett and P. Poole. 2021. Deciphering bacterial

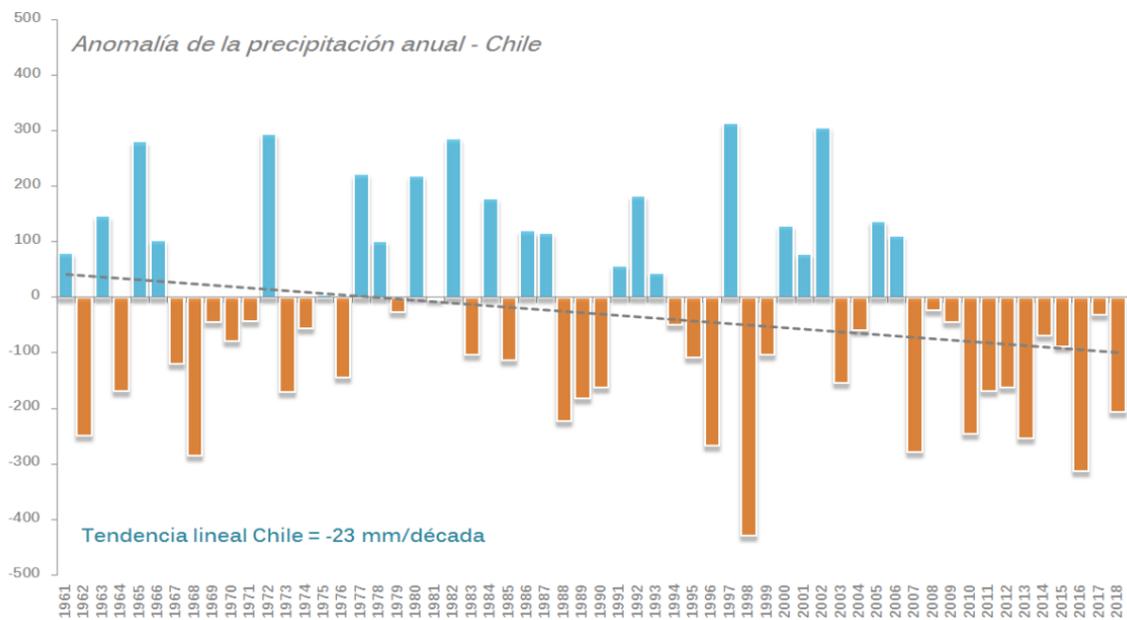
- mechanisms of root colonization. *Environ. Microbiol. Rep.* 13: 428-444.
26. Lagos, N. 2019. Formulación y almacenaje de bacterias promotoras del crecimiento vegetal en biocarbón. Tesis pregrado. Universidad de Concepción, Chillán.
  27. Lehmann, J., M. Rillig, J. Thies, C. Masiello, W. Hockaday and D. Crowley. 2011. Biochar effects on soil biota – a review. *Soil Biol. Biochem.* 43: 1812–1836.
  28. Martínez-Viveros, O., M. Jorquera, D. Crowley, G. Gajardo and M. Mora. 2010. Mechanisms And Practical Considerations Involved In Plant Growth Promotion By Rhizobacteria. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 10(3): 293-319.
  29. Mella, A. y A. Kühne. 1985. Sistemática y descripción de las familias, asociaciones y series de los suelos derivados de materiales piroclásticos de la zona Central-Sur de Chile, in: Tosso, J. (Ed.), *Suelos volcánicos de Chile*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile. pp. 548-716.
  30. Muñoz, C., M. Ginebra y E. Zagal. 2019. Variación de los flujos de gases de efecto invernadero y las propiedades del suelo con la adición de biochar de desechos agrícolas en suelos volcánicos y no volcánicos. *Sustainability.* 11 (7): 1831.
  31. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). 2005. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. 79(289).
  32. Pandit, N., J. Mulder, S. Hale, A. Zimmerman, B. Pandit and G. Cornelissen. 2018. Multi-year double cropping biochar field trials in Nepal: Finding the optimal biochar dose through agronomic trials and cost-benefit analysis. *Sci. Total Environ.* (637–638):1333-1341.
  33. Puente, M., J. García, E. Rubio y A. Peticari. 2010. Microorganismos promotores del crecimiento vegetal empleados como inoculantes en trigo. Pp:39-44. Publicación Micelánea N°116. INTA. Santa Fe, Argentina.
  34. Rahdari, P. and S. Hoseini. 2012. Drought stress, a review. *Int. J. Agron. Plant Prod.* 3: 443-446.
  35. Sadzawka, A., M. Carrasco, R. Grez, M. Mora, H. Flores y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Serie Actas INIA N°34. INIA La Platina. Santiago, Chile.

36. Sandoval, M., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Publicación N° 5. Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Universidad de Concepción. Chillán, Chile.
37. Sarabia, M., R. Madrigal, M. Martínez e Y. Carreón. 2010. Plantas, hongos micorrízicos y bacterias: su compleja red de interacciones. *Biológicas* 12(1): 65-71.
38. Sepúlveda, E. 2015. Aislamiento y selección de rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR) desde trigo (*Triticum aestivum* L.). Tesis pregrado. Universidad de Concepción, Chillán, Chile.
39. Sepúlveda-Caamaño M., M. Gerding, M. Vargas, E. Moya-Elizondo, P. Oyarzúa and J. Campos. 2018. Lentil (*Lens culinaris* L.) growth promoting rhizobacteria and their effect on nodulation in coinoculation with rhizobia. *Arch. Agron. Soil Sci.* 64(2): 244-256.
40. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), Departamento Protección Recursos Naturales Renovables. 2011. Pauta para estudio de suelos. 26.
41. Thies, J. and M. Rillig. 2009. Characteristics of biochar: biological properties. *Biochar Environ. Man.: Sci. Technol.* 85-105.
42. Trenberth, K. 2011. Changes in precipitation with climate change. *Clim. Res.* 47: 123–138.
43. Vandenhove, H., R. Merckx, M. van Steenberghe and K. Vlassak. 1993. Microcalorimetric characterization, physiological stages and survival ability of *Azospirillum brasilense*. *Soil. Biol. Biochem.* 25(4): 513-519.
44. Wang, D., C. Li, S. Parikh and K. Scow. 2019. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils – A multi-scale analysis. *Geoderma.* 340: 185-191.
45. Weber, K. and P. Quicker. 2018. Properties of biochar. *Fuel.* 217: 240-261.
46. Wu, Z., Y. Zhao, I. Kaleem and C. Li. 2011. Preparation of calcium alginate microcapsuled microbial fertilizer coating *Klebsiella oxytoca* Rs-5 and its performance under salinity stress. *Eur. J. Soil Biol.* 47: 152-159.

47. Yildirim, E., M. Ekinci and M. Turan. 2021. Impact of Biochar in Mitigating the Negative Effect of Drought Stress on Cabbage Seedlings. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 21: 2297-2309.
48. Zaheer, M., H. Ali, W. Soufan, R. Iqbal, M. Habib-ur-Rahman, J. Iqbal, M. Israr and A. El Sabagh. 2020. Potential Effects of Biochar Application for Improving Wheat (*Triticum aestivum L.*) Growth and Soil Biochemical Properties under Drought Stress Conditions. *Land.* 10(11):1125.
49. Zhang, J. and C. You. 2013. Water Holding Capacity and Absorption Properties of Wood Chars. *Energy Fuels*, 27: 2643–2648.

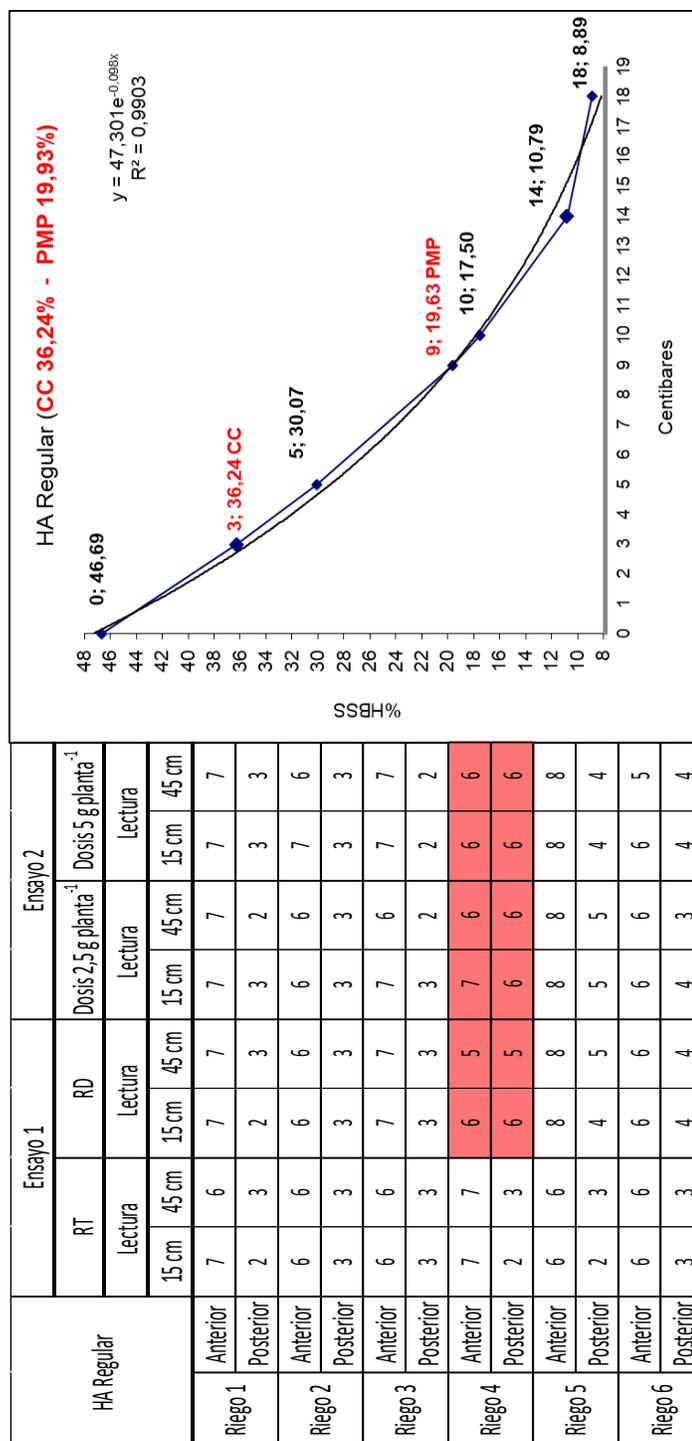
## ANEXOS

### Anexo 1. Tendencia de la precipitación total anual en Chile.



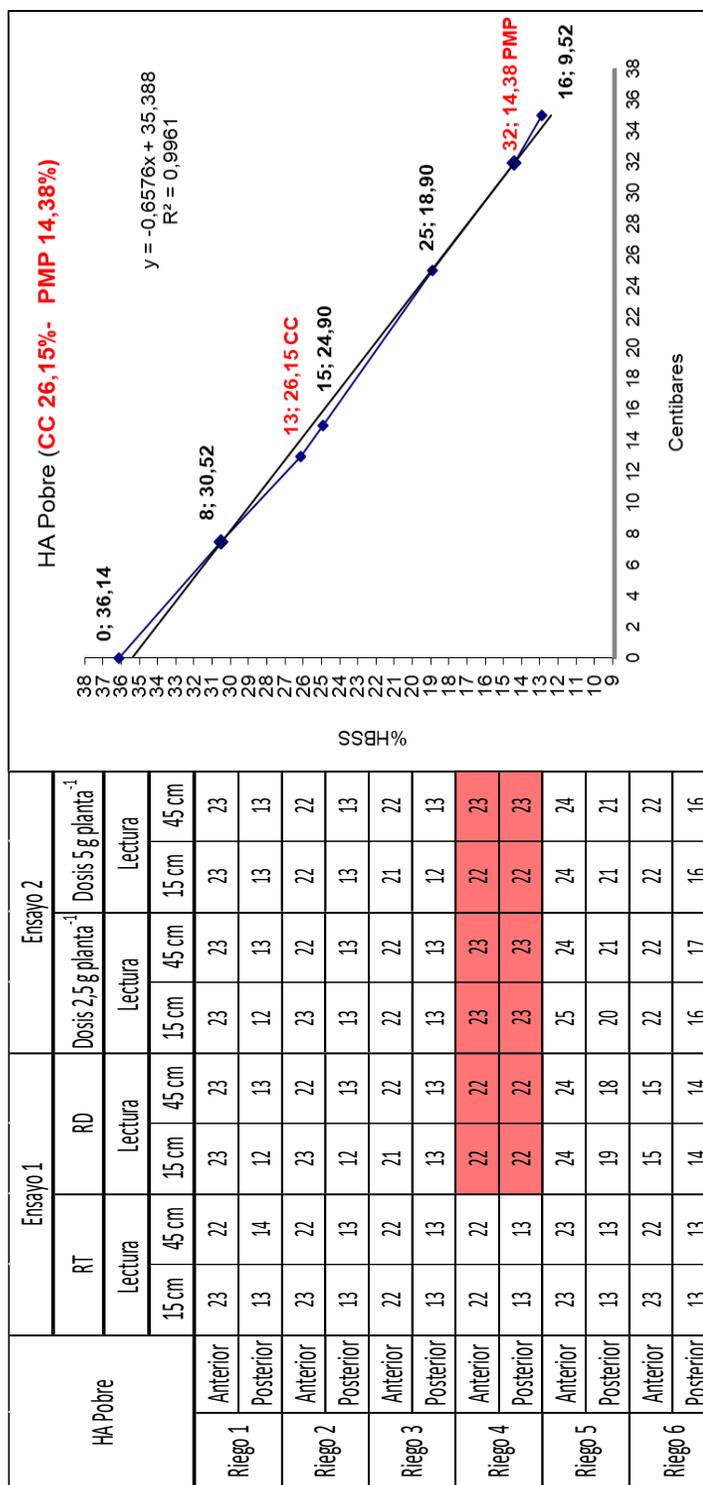
Fuente: Dirección Meteorológica de Chile

**Anexo 2.** Lecturas obtenidas de sensores WATERMARK® Modelo 200SS ubicados a 15 cm y 45 cm de profundidad, monitoreados un día antes y 2 horas después de cada riego para los ensayos 1 y 2; y curvas de calibración de humedad del suelo de HA Regular.



Celdas coloreadas en rojo representan el cuarto riego no realizado

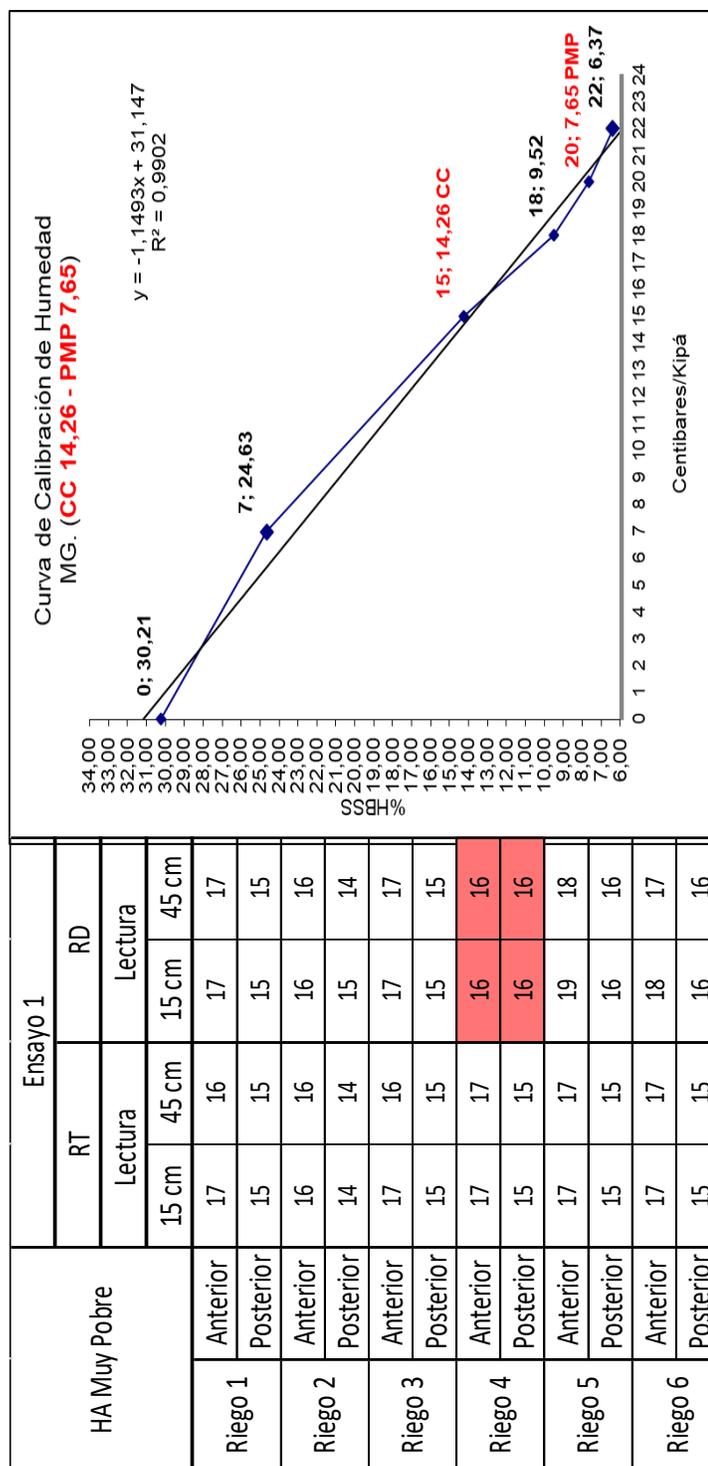
**Anexo 3.** Lecturas obtenidas de sensores WATERMARK® Modelo 200SS ubicados a 15 cm y 45 cm de profundidad, monitoreados un día antes y 2 horas después de cada riego para los ensayos 1 y 2; y curvas de calibración de humedad del suelo de HA Pobre.



HA Pobre	Ensayo 1				Ensayo 2				
	RT		RD		Dosis 2,5 g planta <sup>-1</sup>		Dosis 5 g planta <sup>-1</sup>		
	Lectura		Lectura		Lectura		Lectura		
	15 cm	45 cm	15 cm	45 cm	15 cm	45 cm	15 cm	45 cm	
Riego 1	Anterior	23	22	23	23	23	23	23	23
	Posterior	13	14	12	13	12	13	13	13
Riego 2	Anterior	23	22	23	22	22	22	22	22
	Posterior	13	13	12	13	13	13	13	13
Riego 3	Anterior	22	22	21	22	22	22	21	22
	Posterior	13	13	13	13	13	13	12	13
Riego 4	Anterior	22	22	22	22	23	23	22	23
	Posterior	13	13	22	22	23	23	22	23
Riego 5	Anterior	23	23	24	24	25	24	24	24
	Posterior	13	13	19	18	20	21	21	21
Riego 6	Anterior	23	22	15	15	22	22	22	22
	Posterior	13	13	14	14	16	17	16	16

Celdas coloreadas en rojo representan el cuarto riego no realizado

**Anexo 4.** Lecturas obtenidas de sensores WATERMARK® Modelo 200SS ubicados a 15 cm y 45 cm de profundidad, monitoreados un día antes y 2 horas después de cada riego para los ensayos 1; y curvas de calibración de humedad del suelo de HA Muy pobre.



Celdas coloreadas en rojo representan el cuarto riego no realizado

**Anexo 5.** Evapotranspiración, precipitación acumulada y temperatura de aire obtenidos de estación meteorológica Nueva Aldea INIA.

