Información Tecnológica
Vol. 34(3), 1-10 (2023)
http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642023000300001

Alternativas para el manejo integrado de *Rhizoctonia solani* Kühn en el cultivo de papa

Carlos A. Betancourth[1]*, Benjamín A. Sañudo[2], Carlos A. Flórez[2] y Claudia E. Salazar[1]
(1) Facultad de Ciencias Agrícolas, Dpto. de Producción y Sanidad vegetal, Universidad de Nariño. Pasto, Colombia
(correo-e: cbet70@udenar.edu.co; claudiasalazarg@udenar.edu.co)
(2) Grupo de investigación de Sanidad Vegetal (GRISAV), Universidad de Nariño. Pasto, Colombia
(correo-e: carlosflorezpgl@udenar.edu.co; benjaminssalfre@udenar.edu.co)

* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

Recibido Ago. 3, 2022; Aceptado Sep. 23, 2022; Versión final Nov. 18, 2022, Publicado Jun. 2023

Resumen

En esta investigación se desarrolla una prueba demostrativa para evaluar una estrategia de manejo integrado de *Rhizoctonia solani* Kühn, causante de la costra negra de la papa (*Solanum tuberosum* L.). Se utiliza el agente biocontrol *Bacillus subtilis* (Ehrenberg) Cohn (cepa comercial QST 713) y la cebada (*Hordeum vulgare* L.) como abono verde, y se compara con un control químico (tratamiento convencional). Los resultados muestran un mejor comportamiento del cultivo en la parcela de manejo integrado, con menor incidencia de la enfermedad en las etapas de brotación (10.48 %) y tuberización (14.26%), en comparación con el manejo convencional (testigo) que alcanzó incidencias de 18.48 y 21.99% respectivamente. No se presentaron diferencias en la incidencia de costra negra en los tubérculos, aunque al analizar la severidad, la parcela testigo presentó mayor nivel de enfermedad. En conclusión, el tratamiento de manejo integrado permite un mejor manejo de la enfermedad costra negra de la papa en comparación al control químico.

Palabras clave: abono verde; Bacillus subtilis; Hordeum vulgare; costra negra; cultivo de papa; Solanum tuberosum; manejo integrado

Integrated management alternatives for *Rhizoctonia solani* Kühn in potato crops

Abstract

This research study implements a demonstration trial to evaluate an integrated management strategy for *Rhizoctonia solani* Kühn, which causes potato (*Solanum tuberosum* L.) black scurf. The treatment applies the biocontrol agent *Bacillus subtilis* (Ehrenberg) Cohn (commercial strain QST 713) in combination with barley (*Hordeum vulgare* L.) green manure. This is compared to a chemical control (conventional treatement). The results show improved crop performance in the integrated management plot, with lower incidence of the disease during both sprouting (10.48%) and tuberization (14.26%) stages, as compared to the conventional management (control), which has incidences of 18.48% and 21.99%, respectively. No differences are found in the incidence of black scurf on tubers. However, disease severity is higher in the control plot than in the treatment plot. In conclusion, the integrated management treatment allows improving the management of potato black scurf when compared to chemical control methods.

Keywords: green manure; Bacillus subtilis; Hordeum vulgare; black scurf; potato crop; Solanum tuberosum; integrated management

INTRODUCCIÓN

Rhizoctonia solani Kühn (teleomorfo: *Thanatephorus cucumeris* (Frank) Donk); Cantharellales: Ceratobasidiaceae) es un hongo habitante natural del suelo y patógeno radicular necrotrófico (Kotba et al., 2020), causante de enfermedades que involucran una sintomatología directa de pudrición en semillas, raíces, hipocótilo, corona, tallo, ramas, vainas, tizón de plántulas, costra negra, chancros en estolones y tallos, así como "*damping off*" antes y después de la emergencia (Ajayi-Oyetunde y Bradley, 2017). *R. solani* tiene más de 200 especies de plantas hospedero, especialmente solanáceas, aunque se ha reportado en más de 16 familias. *R. solani* GA-3 PT es el principal agente causal de la enfermedad costra negra y chancro del tallo de la papa, o la "rizoctoniasis", la cual puede ocasionar perdidas por encima del 30% en los rendimientos comerciales (Ajayi-Oyetunde y Bradley, 2017; Chavarro et al., 2021; Kotba et al., 2020).

En el departamento de Nariño (Colombia), el control de *R. solani* se ha realizado mayormente mediante la aplicación de fungicidas; se ha estimado que al no realizar ningún tipo de manejo de la enfermedad las pérdidas en los rendimientos oscilan entre el 23 y 28% (Betancourth et al., 2021; 2022). En la actualidad se destacan los inhibidores externos de quinona (QoI), los inhibidores de la enzima succinato deshidrogenasa (SDHI), los inhibidores de desmetilación (DMI), y el grupo fenilpirrol (PP). A pesar de que estas moléculas poseen un amplio espectro de actividad, se reconoce que intervienen en puntos específicos dentro de una ruta metabólica del hongo, con tendencia al aumento del riesgo de surgir poblaciones con resistencia (Ajayi-Oyetunde et al., 2017). Según el Comité de Acción de Resistencia a los Fungicidas (FRAC) (2022), estas moléculas tienen un riesgo de generar resistencia medio a alto. La aplicación constante de fungicidas sintéticos debe reconsiderarse, debido a los mecanismos de variación genética de los fitopatógenos, residuos tóxicos, contaminación ambiental, e incremento de costos de producción (Gikas et al., 2022).

Actualmente, se tiene como posibilidad sostenible del empleo de productos biológicos, que incluyen unidades reproductivas y metabolitos secundarios de origen microbiano, principalmente de hongos y bacterias antagonistas aisladas de la endosfera o rizosfera, capaces de ocasionar un efecto supresor de enfermedades que puede ser comparable al logrado por los plaguicidas (O'Brien, 2017). También, la rotación de cultivos con abonos verdes, se considera una práctica que beneficia la salud del suelo y la sanidad del cultivo de papa al cambiar el hospedero de los agentes causantes de enfermedades, principalmente aquellos provenientes del suelo. Además, mejoran propiedades edafológicas físicas, químicas y biológicas (Jayaraman et al., 2021). En el departamento de Nariño (Colombia), Betancourth et al. (2022), encontraron resultados eficaces de un biofungicida formulado a partir de la cepa comercial de *Bacillus subtilis* QTS 713, con un comportamiento estadísticamente igual al ingrediente activo Pentiopirad, logrando protección contra el fitopatógeno, al evidenciar por sintomatología menores porcentajes de incidencia, y permitiendo rendimientos significativamente más altos que el testigo (sin control).

Los ingredientes activos como unidades formadoras de colonia o metabolitos secundarios provenientes de cepas de *B. subtilis* han logrado establecerse comercialmente y en múltiples presentaciones con efecto antifúngico y como acondicionadores del suelo, algunos ejemplos son Rhapsody®, Rhizo Plus®, Serenade® Max, Bio-subtilis®, SUBTICROP ®, Brevibac ®, Subtilin ® y Bactox ®. También cabe destacar otras especies como *B. amyloliquefaciens* contenidas en productos como RhizoVital®, Serifel® o Taegro®. Otros biofungicidas del género son Sonata® con *B. pumilus,* ECCOBIOX® conteniendo *B. megaterium* y ECOTERRA® con múltiples cepas de la bacteria (Fira et al., 2018). Bertuzzi et al. (2022), informan que *B. subtilis* QTS 713 tiene la capacidad de producir lipopéptidos pertenecientes a las familias iturina, fengycina y surfactina, moléculas con propiedades antifúngicas.

En el mismo sentido, Betancourth et al. (2021), registraron que el empleo de cebada, avena, nabo forrajero y mostaza como abonos verdes disminuyen el ataque de *R. solani*, además de una mayor producción de tubérculos, en comparación con una parcela testigo (suelo sin cobertura). Al analizar aspectos como la consecución de semilla, el aporte de biomasa, y la funcionalidad del cultivo, el uso de cebada como abono verde presenta las mejores posibilidades de adopción. El aporte de la biomasa de un abono verde, que, tras un periodo de biodegradación natural, al igual que materiales de compost permiten un mejor entorno para la inoculación de agentes de biocontrol específicos como *Bacillus* spp. (Bagri y Kanwar, 2017). Dentro de este género, la especie *B. subtilis* ha demostrado tener un comportamiento promisorio en diferentes agroecosistemas, al ser un agente protector de brotes y raíces, o su uso en el tratamiento de semillas vivas, demostrando potencial de proporcionar un aumento significativo de rendimientos. Además, la bacteria posee un alto grado de tolerancia a factores ambientales; hasta la primera década del nuevo milenio diferentes cepas han demostrado eficiencia *in vitro* en el control de 23 tipos de patógenos de plantas, número que a la fecha seguramente ha incrementado (Caulier et al., 2019).

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto sobre el ataque de *R. solani* en el cultivo de papa (variedad Diacol Capiro), realizando un manejo integrado que incluyó la incorporación de cebada como abono verde, más la aplicación del biofungicida conteniendo a *B. subtilis*, en comparación con un manejo convencional (control químico) de la enfermedad realizado por los agricultores.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó a partir de segundo semestre agrícola de 2020 con duración de un año, en los municipios de Pasto, Ipiales y Túquerres estableciendo pruebas demostrativas en las veredas Mapachico Centro (2710 m.s.n.m; 1°16'53" Lat. N, 77°33'12" Long. W), Urambud (2922 m.s.n.m; 0°50'56.6" Lat. N, 77°39'16.1" Long. W) y Santa Ana (2843 m.s.n.m; 1°5'3.22" Lat. N, 77°33'36.9" Long. W). En cada localidad se seleccionó un lote donde se había sembrado papa durante dos semestres y con presencia de la enfermedad costra negra a través de la observación de síntomas de quemazón de estolones en estados iniciales de desarrollo y enrollamiento foliar, chancros del tallo y formación de tubérculos aéreos para la etapa de floración de las plantas.

Área y diseño experimental

En cada localidad se estableció un diseño de parcelas apareadas, en donde se evaluaron dos tratamientos correspondientes al manejo integrado (abono verde + biofungicida) y un testigo, o control químico, estrategia mayormente realizada por los agricultores "manejo convencional", las repeticiones correspondieron a las tres localidades. El área de cada parcela experimental fue de 20 x 15 m.

Establecimiento e incorporación del abono verde

La cebada como abono verde se sembró al voleo en cantidad de 70 kg. ha^{-1}. En la siembra se aplicó fertilizante NPK 13-26-6 en cantidad de 200 kg. ha^{-1}, y tapado con rastrillo. Se realizaron labores de deshierbe un mes después de la siembra, y la aplicación del ingrediente activo Dimetoato 1.5 cc. L^{-1} de agua para el control de poblaciones de insectos chupadores. En la etapa de espigamiento y antesis se cortó la biomasa aérea de la cebada, realizando un picado de los tejidos, los cuales se incorporaron con azadón (Betancourth et al., 2021).

Establecimiento del cultivo de papa

Después de dos meses de la incorporación del abono verde, se realizó la delimitación del área, conservando la misma distribución experimental en el diseño de parcelas apareadas; en cada una se hizo la preparación manual y el trazado de 15 surcos de 20 m de longitud y con separación entre ellos de 0.80 m. Posteriormente se realizó el guachado y el picado del fondo de los surcos para la siembra y fertilización de la papa, utilizando semilla de segunda categoría (60-80 g) de la variedad Diacol Capiro, sembrando un tubérculo por sitio con distancia de 0.40 m entre plantas.

Aplicación del biofungicida

Se utilizó el biofungicida Rhapsody® (Serenade®) cuyo ingrediente activo corresponde a *Bacillus subtilis* QST713, la dosis utilizada fue de 5 cc. L^{-1} de agua, haciendo uso de un equipo de aspersión manual con boquilla tipo cono lleno y una descarga promedio de 600 cc/min. Las aplicaciones se realizaron en tres ocasiones, dirigidas al suelo y procurando un buen humedecimiento del sitio sembrado: 1) después de realizar la incorporación del abono verde; 2) en el momento de la siembra, y 3) durante la emergencia total de las plantas (Betancourth et al., 2022).

Variables evaluadas

Se evaluaron las variables: 1) número de tallos por planta; 2) la altura de la planta; 3) incidencia de los síntomas asociados con la enfermedad durante la etapa de emergencia de las plantas, en floración y en la cosecha; 3) severidad de la costra negra en tubérculos de papa; 4) número y peso de tubérculos por categoría de tamaño producidos por planta; 5) rendimientos comerciales estimados en toneladas por hectárea.

El número de tallos se evaluó, después de un mes de la emergencia de las plantas, en los cinco surcos centrales de cada parcela experimental, se escogieron de manera aleatoria diez plantas y se contabilizó el número de tallos principales por planta. Posteriormente, durante el inicio de la floración, de esta misma manera se determinó la altura de la planta en centímetros (cm) utilizando una cinta métrica, y midiendo desde la base de la planta hasta el punto de crecimiento más alto. Durante la cosecha, se recolectaron los de tubérculos de cada planta, se separaron por categoría de tamaño (grandes > 90 g; medianos 45-90 g; y pequeños <45 g), y se hizo el conteo y pesaje (kg) de cada categoría. Con los pesos de tubérculos grandes y medianos por planta, se estimó la producción por hectárea de papa comercial en toneladas, teniendo en cuenta las distancias de siembra y la población de plantas.

Incidencia y severidad de Rhizoctonia solani

La evaluación de la incidencia de la enfermedad causada por *R. solani*, se realizó en tres momentos: (1) para la etapa de emergencia total de las plantas (30 días después de la siembra), se contabilizó el porcentaje de plantas, con síntomas de brotación tardía, a causa de chancros en los brotes, o muerte total de los mismos;

(2) en la etapa de inicio de tuberización, coincidiendo con la floración, se calculó el porcentaje de plantas con síntomas de enrollamiento foliar, chancros basales, o necrosis de extremos de estolones y de raíces; y (3) en el momento de la cosecha, se determinó la presencia de esclerocios en la superficie de los tubérculos. Las dos primeras evaluaciones se realizaron en los cinco surcos centrales, para la última medición, en cada parcela experimental se tomaron 5 muestras al azar de 50 tubérculos. Los porcentajes de incidencia se calcularon mediante la fórmula:

$$\% \text{ Incidencia} = \frac{\text{\# de plantas o tubérculos con síntomas de } \textit{R. solani}}{\text{\# de plantas o tubérculos evaluados}} * 100 \quad (1)$$

La observación de la sintomatología se realizó de acuerdo con lo descrito por Kumar et al. (2017) y Chavarro et al. (2021). Para comprobar la presencia de *R. solani* en plantas sintomáticas se realizaron aislamientos a partir de tejidos afectados en medio de cultivo papa dextrosa agar (PDA) siguiendo los procedimientos descritos por Woodhall et al. (2007). En las muestras de tubérculos obtenidas para determinar la incidencia de costra negra, en cada repetición se realizaron diez (10) observaciones de severidad, determinando el nivel de la superficie del tubérculo cubierto con esclerocios siguiendo la siguiente escala: (1) Sin síntomas visibles; (2) 1% de la superficie cubierta con esclerocios; (3) 10% de la superficie cubierta con esclerocios; (4) 25% de la superficie cubierta con esclerocios; (5) 50% de la superficie cubierta con esclerocios; y (6) >75 % de la superficie cubierta con esclerocios.

Análisis de datos

El análisis estadístico se realizó de manera manual, mediante análisis de varianza y la comparación de medias utilizando la prueba de t-Student (α=0,05), con los datos cuantitativos de número de tallos, altura de planta y producción de tubérculos, incidencia de *R. solani* en tres momentos y severidad de costra negra en tubérculos de papa, que también se analizó a través de tablas de frecuencia. El modelo matemático del diseño de un factor para parcelas apareadas corresponde a:

$$Yij = \mu + Aj + eijk \quad (2)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de realizar el análisis estadístico de las variables evaluadas, los resultados permitieron comparar dos tratamientos para el manejo del hongo *R. solani* en el cultivo de papa, los cuales consistieron en un control químico (testigo), utilizando el fungicida pentiopirad, y al control integrado conformado por el beneficio de un abono verde y la inoculación del agente de control biológico de enfermedades *B. subtilis*.

Altura de planta y número de tallos

De acuerdo con la prueba de t- Student (Tabla 1), los mayores valores para las variables altura de planta y número de tallos se presentaron en la parcela de manejo integrado en comparación con el testigo, sin embargo, solamente las diferencias fueron significativas para el número de tallos. Los resultados permiten inferir que tanto la estrategia de abonos verdes, y la aplicación del biofungicida de origen bacterial, tuvieron un efecto de promoción del crecimiento y desarrollo del cultivo (Figura 1), eventos que probablemente estén relacionados a una menor afectación de los brotes que dan lugar a la formación de tallos principales, además de un sistema radical más sano, y por ende más eficiente, observaciones similares a las registradas por Betancourth et al. (2021); (2022); Larkin y Brewer (2020); Yossen et al. (2011).

En la figura 1 se indican plantas de papa Diacol Capiro de las parcelas experimentales; las fotografías de la parte superior fueron tomadas después de la emergencia total (>80% de las plantas emergidas del lote experimental); mientras en la inferior corresponden al estado antes de floración (90 días después de la siembra), observándose un mejor comportamiento para el tratamiento de manejo integrado.

Los resultados están relacionados probablemente con la mayor disponibilidad de nutrientes, además de una mejora del entorno físico para el desarrollo radicular y su funcionalidad. Ramírez et al. (2011), describen que cultivos de gramíneas utilizadas como abonos verdes pueden alcanzar una gran cobertura del suelo (83-99%) y aportar contenidos de biomasa entre 1226-1928 $g.m^{-2}$, con altos valores de relación C/N (27-39) y contenido en fibra digestible (53-60%), lo que permite mayor actividad biológica principalmente de la microbiota heterótrofa.

Tabla 1: Prueba de t- Student para las variables número de tallos, altura de la planta, porcentajes de incidencia, severidad de costra negra, número de tubérculos por categoría de tamaño y rendimiento comercial.

Variable	S^2	SD	p valor	Manejo integrado	Testigo
%Incidencia 1	1.41	0.69	0.0138*	10.466 [b]	18.487 [a]
%Incidencia 2	3.45	1.07	0.0114*	14.246 [b]	21.992 [a]
%Incidencia 3	6.17	1.43	0.0041*	21.267 [b]	27.800 [a]
% Severidad	14.84	2.22	0.02864*	7.200 [b]	14.233[a]
No. Tallos	0.18	0.24	0.03516*	5.007 [a]	3.647 [b]
Altura(cm)	0.24	0.28	0.1945[ns]	38.927 [a]	36.673 [a]
Número de tubérculos grandes/planta	0.50	0.36	0.03536*	4.993 [a]	3.298 [b]
Número de tubérculos medianos/planta	0.23	0.28	0.08824[ns]	8.813 [a]	9.445 [a]
Número de tubérculos pequeños/planta	0.44	0.38	0.03163*	10.047 [b]	12.504 [a]
Rendimiento comercial (t. ha^{-1})	19.158	2.705	0.004472*	36.400 [a]	29.075 [b]
* indica diferencias estadísticamente significativas; ns indica diferencias no significativas.					

Autores como Jayaraman et al. (2021); N'Dayegamiye et al. (2017), manifiestan beneficios en la fertilidad de los suelos, al emplear abonos verdes en la rotación de cultivos, práctica que puede prevenir la degradación del suelo por erosión, actuando como una cobertura vegetal protectora; además el corte e incorporación de la biomasa vegetal contribuye una considerable cantidad de material orgánico, que favorece las condiciones estructurales del suelo, así mismo, la descomposición de los tejidos estimula la actividad biológica en la rizosfera, que desencadena mineralización de nutrientes contribuyendo al desarrollo y crecimiento de cultivo, además de la mayor producción de compuestos con capacidad supresora de agentes bióticos negativos.

Adicionalmente, los resultados también deben estar influenciados por la acción del biofungicida a base de la bacteria *B. subtilis*, la cual se considera como un antagonista directo del patógeno, debido a la producción de metabolitos peptídicos de acción antibiótica y enzimas que inciden en la desorganización citoplasmática del hongo. Además, complementan su acción de biocontrol al participar en la inducción de los sistemas de defensa de la planta, al ser una de especie de rizobacteria promotora del crecimiento y desarrollo vegetal (Ben-Khedher et al., 2020; Fira et al., 2018).

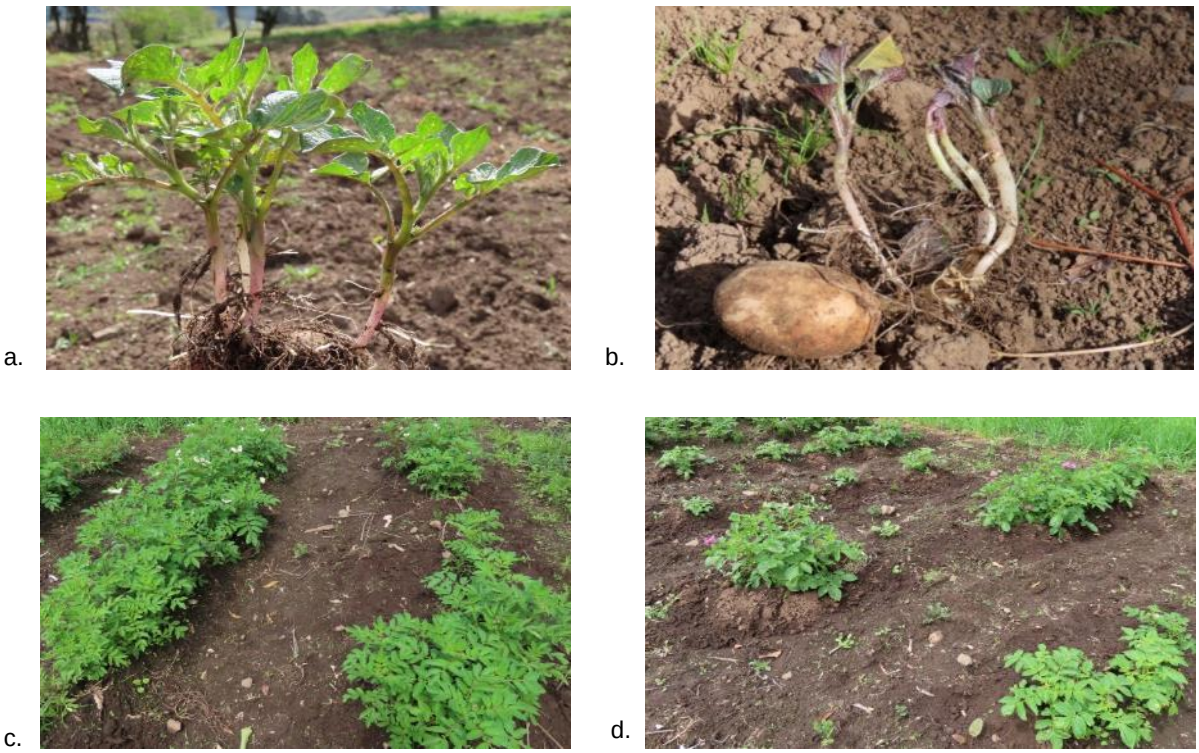


Fig. 1: Comparación de plantas de papa variedad Diacol Capiro entre los tratamientos. A y C corresponden a unidades de muestreo de la parcela de manejo integrado; B y D se tomaron del tratamiento testigo.

Estudios realizados por Selva et al. (2013), registran para la variable número de tallos por planta promedios de 4.25 a 4.5, al realizar un pretratamiento con cepas rizosfericas de *Bacillus*, así mismo lograron mayor cantidad de biomasa, lo que se puede relacionar con valores más altos en variables relacionadas con el crecimiento vegetativo de la planta, resultados similares a los obtenidos en esta investigación alcanzando un promedio de 5.007 tallos para el tratamiento de manejo integrado y de 3.647 para el testigo. Arcos y Zúñiga (2015) reportan diferencias no significativas para la variable altura de la planta, al inocular cepas rizosféricas de las especies *B. subtilis* y *B. amyloliquefaciens*, aunque si beneficios en la productividad y disminución de la enfermedad causada por *R. solani*, situación similar a lo observado en esta investigación.

Incidencia y severidad de Rhizoctonia solani

La variable incidencia se determinó, a partir del registro de síntomas tempranos (% incidencia 1), durante la etapa de floración evaluando síntomas de enrollamiento foliar y chancros en los tallos (% incidencia 2), y para la etapa de cosecha determinando la presencia de costra negra (% incidencia 3). En la etapa de emergencia se observaron lesiones en la base de los tallos en brotación ocasionando secamientos parciales y debilitamiento en el desarrollo; tanto en tallos, estolones y raíces, de aspecto seco, de color marrón y generalmente hundidas. Para la segunda evaluación en donde coinciden las etapas de floración e inicio de tuberización se determina la cantidad de plantas con síntomas de enrollamiento, producción de tubérculos aéreos, y chancros en el tallo (Figura 2).

De acuerdo con el análisis estadístico (Tabla 1), existen diferencias para la variable de incidencia, en los tres momentos de evaluación. Se observó un mejor comportamiento de la parcela del manejo integrado, con porcentajes promedios de 10.466, 14.246, y 21.267 %, respectivamente para las evaluaciones de la afectación en etapa inicial, durante la floración y en la cosecha. Resultados estadísticamente diferentes a los obtenidos con la parcela testigo donde se determinaron promedios de 18.487, 21.99, y 27.80 % (Tabla 1). Lo que permite asumir, que el empleo de las estrategias de manera integral, disminuyó, el ataque de la enfermedad en aproximadamente un 8% durante la etapa del cultivo, y un 6.5% en la incidencia de esclerocios visibles en los tubérculos cosechados.

Igualmente, hubo diferencias estadísticas para la variable severidad, alcanzando un promedio de 7.2% para el tratamiento de manejo integrado y de 14.233 % para el testigo. Al analizar su severidad mediante tablas de frecuencia se encontró un mayor nivel de la enfermedad en la parcela testigo, donde el 43.33% de las muestras analizadas presentaron un nivel moderado de la enfermedad, lo que equivale al 10% de la superficie cubierta con esclerocios, y el 36.67% alcanzaron un nivel del 25% del síntoma de costra negra. Respecto a la parcela del manejo integrado, el mayor porcentaje de las muestras (46.67%) se agrupó en la categoría dos de la escala de severidad, con un nivel de enfermedad del 1% de la superficie cubierta con esclerocios, seguida de la categoría 3 (10% de síntomas), con un 30% de las muestras analizadas. Es probable que la formación de esclerocios se encuentre relacionado con factores ambientales, así como los periodos en los que se realiza la cosecha. Más allá de la afectación a la calidad del tubérculo, los esclerocios son potenciales fuentes de inoculo de la enfermedad, epidemiológicamente importantes, por lo tanto, se considera relevante determinar, cuáles son las condiciones que predisponen la formación de estas estructuras de resistencia (Muzhinji et al., 2018).

Si bien la costra negra es el signo más notable de la enfermedad, la fase más dañina de la enfermedad ocurre cuando el hongo ataca los brotes subterráneos antes de que emerjan del suelo y los tallos y estolones, interfiriendo con el transporte de agua y nutrientes, por ejemplo, en el traslado del almidón de las hojas al almacenamiento en los tubérculos. Una lesión puede expandirse logrando constreñir y matar tallos o estolones (Kumar et al., 2017; Muzhinji et al., 2018). En este sentido, el manejo de la costra negra de la papa, integrando las estrategias de abonos verdes y de control biológico, cebada y *B. subtilis* conllevo a un menor ataque de *R. solani*, durante todo el desarrollo del cultivo, logrando un mayor número de tallos y estolones sanos, además permitiendo un mejor desempeño fisiológico del sistema radical de la planta, menos alterado por la acción del fitopatógeno.

Las áreas dedicadas al monocultivo y con incidencia de la enfermedad de la costra negra predisponen un aumento constante de inóculo, y un inadecuado control químico puede desencadenar un panorama complicado para los productores, al aumentar la prevalencia del hongo y poblaciones menos susceptibles a moléculas fungicidas; sin embargo, existen posibilidades de supresión del patógeno por condiciones inherentes a la funcionalidad del suelo, a través de la práctica de rotación de cultivos, que además de la falta de selección positiva del fitopatógeno, también da tiempo necesario para que poblaciones antagonistas destruyan biológicamente a las unidades infectivas del hongo (Larkin y Brewer, 2020).

Larkin (2015) expone que, la capacidad supresora de la rotación de cultivos sobre enfermedades causadas por patógenos del suelo se logra por, una disminución de los niveles de inóculo, la producción de compuestos con efecto fungitóxico directo sobre el patógeno, y el aumento de poblaciones microbianas antagónicas, que

compiten con agentes fitopatógenos, o mediante interacciones que resulten en inducción de respuestas de resistencia sistémica, y promoción del crecimiento y desarrollo.

En referencia a las posibilidades de los mecanismos de acción del biofungicida conteniendo la cepa comercial de *B. subtilis* se ha revisado que, este tipo de productos compuestos por unidades reproductivas de microorganismos biocontroladores, además de sus metabolitos secundarios y enzimas líticas, que presentan una acción citotóxica sobre la fisiología de los fitopatógenos, pueden lograr efectos bioestimulantes en el hospedero. Características que les ha dado mayor protagonismo en la agricultura global, complementando las medidas de control, como el uso de fungicidas sintéticos e incluso como alternativas para su reemplazo (Khakimov et al., 2020).



Fig. 2: Síntomas de *R. solani* en el cultivo de papa (*S. tuberosum*). A. Muerte de brotes; B. Lesiones tempranas en tallos; C. Chancros del tallo; D. Planta con enrollamiento foliar y madurez prematura.

Selva et al. (2013) evaluaron cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento de plantas (PGPR), entre las cuales *B. subtilis* mostró características de antagonismo a causa de la producción de sideróforos y antibióticos con efecto tóxico sobre *R. solani*, además un efecto positivo sobre los rendimientos de papa. Igualmente, Arcos y Zuñiga (2015) determinaron una disminución de la incidencia y severidad de *R. solani* en el cultivo de papa con el empleo de las PGPR *B. subtilis* y *B. amyloliquefaciens*.

B. subtilis es la especie que ha tenido mayor reconocimiento, varias cepas se comercializan como un agente de biocontrol y se utilizan para el manejo de *R. solani* en cultivos de papa (Ben-Khedher et al*.,* 2020). El efecto supresor de la bacteria se ha relacionado con una amplia gama de moléculas antimicrobianas (metabolitos secundarios) procedentes de las rutas biosintéticas y naturaleza química, que se pueden categorizar como: péptidos ribosomales (RP), compuestos volátiles, sideróforos, policétidos (PK), péptidos no ribosomales (NRP) e híbridos entre PK y NRP los cuales desencadenan un fuerte impacto de antibiosis directa sobre agentes fitopatógenos (Caulier et al., 2019).

Algunos misceláneos antimicrobiales descritos son proteínas antifúngicas, Proteína B29, Bacisubin, WH1fungin, Plantazolicin, Iturina, Fengycina, 2-heptanona, Pirazina, Naftalina, Bencenamina, N-etilo y otros péptidos similares, estos subproductos del metabolismo bacteriano, afectan a *R. solani*, por alteración de la morfología de las hifas, inhibición de la producción de esteroles, fosfolípidos, ácido oleico y glucanos sintasa, reducción e inhibición de micelio. También limitan el progreso del hongo al involucrar en su secretoma hormonas estimulantes del crecimiento vegetal y pequeñas moléculas (efectores) que participan en la activación del sistema de defensas constitutivas de las plantas, y la expresión de proteínas relacionadas con la patogénesis (Fira et al., 2018; Wu et al., 2019).

Producción de tubérculos y Rendimiento comercial

De acuerdo con la prueba de T-Student (Tabla 1), se presentaron diferencias estadísticas para las categorías de tubérculos grandes y pequeños por planta, así como para el rendimiento estimado en toneladas por hectárea. La producción de tubérculos medianos por planta presentó un comportamiento estadísticamente similar en las dos parcelas de estudio. Al analizar los promedios generales (Tabla 1), la mayor cantidad de tubérculos grandes por planta, se presentó en el tratamiento del manejo integrado; y para los tubérculos pequeños, se evidenció un mayor número en la parcela testigo. Respecto al rendimiento estimado, el manejo integrado alcanzó las 36.4 t. ha^{-1} superando en más de siete toneladas al testigo (29.075 t. ha^{-1}).

A partir de los resultados observados se asume un beneficio en la capacidad de producción del cultivo de papa de una variedad comercial susceptible a *R. solani*, cuando se utilizó la combinación de las estrategias de manejo, con el abono verde (cebada) y el agente de biocontrol (*B. subtilis*), en comparación con un simple control químico, medida que se utiliza de manera convencional en las regiones productoras de Nariño (Betancourth et al., 2022).

Prácticas que incluyen rotación de cultivos, abonos verdes o cultivos de cobertura, así como medidas fitosanitarias basadas en un plan de manejo integrado, en conjunto con actividades que permitan un entorno de equilibrio rizosférico, permiten mantener las poblaciones de patógenos en niveles que no ocasionen pérdidas económicas. Por lo tanto, estas alternativas de manejo permiten una mejora de la salud del suelo, al reducir la incidencia y severidad de enfermedades, y consecutivamente, permitir incrementos en la productividad de los cultivos (Saini et al., 2019). Los abonos verdes empleados en sistemas de producción de papa, en función del cultivo utilizado en la rotación, producen cambios característicos en la comunidad microbiana del suelo, que afectan la incidencia y el progreso de enfermedades (Larkin et al., 2017).

Resultados de investigaciones realizadas por Larkin y Brewer (2020), recomiendan la rotación estándar con el uso de gramíneas como cebada o avena, en conjunto con trébol rojo, en secuencia de dos años con el cultivo de papa para el manejo de la costra negra, sin embargo, las rotaciones con cebada no tuvieron una supresión total del patógeno, por lo cual, se debe considerar otros cultivos de cobertura más efectivos para su uso junto con la cebada. Observaciones realizadas por los mismos autores, sugieren, que el ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.), y probablemente la variedad “Lemtal”, tiene un mayor efecto como cultivo de cobertura en conjunto con cebada para suprimir la rizoctoniasis en el consecutivo cultivo de papa. Igualmente afirman que rotaciones con leguminosas no sea el mejor complemento para el manejo de *R. solani*.

Los resultados positivos en la parcela de manejo integrado, respecto a una menor incidencia de *R. solani*, y mayores rendimientos comerciales de papa probablemente están relacionados con contribuyentes bióticos y abióticos al suelo, permitiendo un efecto supresor de la enfermedad. Jayaraman et al. (2021), afirman que son complejas las interacciones del suelo, la planta y los componentes ambientales involucrados en un triángulo de enfermedad, no obstante, su estudio detallado es crucial para la búsqueda de estrategias que logren reducir el ataque de fitopatógenos.

Principalmente, la práctica de abonos verdes tiene el propósito de favorecer la comunidad microbiana del suelo, que en primer momento busca mantener o regenerar la diversidad rizosférica, y de manera específica el parasitismo contra patógenos, la producción de metabolitos, toxinas y antibióticos, la competencia por recursos, nutrientes, o sustratos, así como una interacción estrechamente relacionada con la expresión de genes de resistencia a enfermedades en la planta huésped inducida por microorganismos beneficiosos; y por su participación en el ciclo, rotación y disponibilidad de nutrientes (Jayaraman et al., 2021). Por lo cual, esta estrategia busca equilibrar el microbioma rizosférico, que corresponde a las comunidades microbianas que varían considerablemente de acuerdo con el tipo de suelo, el de uso de la tierra, las especies de plantas y sus interacciones. Las bacterias constituyen el taxón dominante dentro de los microbiomas vegetales, sobresaliendo el papel de las rizobacterias, entre las cuales la especie *B. subtilis* es una de las más comunes por su gran capacidad de colonización de la rizosfera, y su interacción biológica mediada por metabolitos especializados, incluidos los compuestos volátiles (Yadav, 2020).

De acuerdo con Caulier et al. (2019); Fira et al. (2018); Yadav (2020); uno de los beneficios ecológicos que cumplen las bacterias y tan importantes como los aportes en la nutrición vegetal, corresponde a los obtenidos

en eventos de equilibrio de las poblaciones que afectan el desarrollo y la producción de los cultivos. Los mecanismos de actuación frente a otros organismos están relacionados con procesos antagónicos e inducción de defensas. Los primeros tienen la responsabilidad de una especie dominante o un consorcio de especies distintas, entre ellas se menciona a *B. subtilis* para reducir la incidencia de grupos bióticos que habitan el suelo, mediante acciones de parasitismo, producción de toxinas, excreción de enzimas líticas y síntesis de sustancias antibióticas, afectando la dispersión, formación de propágulos y persistencia de los agentes nocivos para las plantas. Además, esta bacteria sus organelos o sus productos metabólicos tienen la aptitud de inducir en la planta respuestas defensivas frente a los organismos causantes de daño o enfermedad, como el caso de *R. solani.*

CONCLUSIONES

Las estrategias de establecimiento e incorporación de cebada como abono verde y la aplicación de la cepa comercial de *Bacillus subtilis* como agente de control biológico, utilizadas de manera integral permitieron un mejor manejo de la enfermedad costra negra de la papa causada por *Rhizoctonia solani* en comparación con un testigo, el cual representaba el control químico de la enfermedad como medida utilizada de manera convencional por los productores. Las estrategias de manejo integrado de *R. solani* permitieron menor incidencia de síntomas en la etapa inicial y durante el crecimiento del cultivo, aproximadamente un 8% por debajo del control químico; además de un menor nivel de severidad de costra negra, debido a que más del 75% de las muestras analizadas no superaron el 10% de la superficie de los tubérculos con esclerocios, mientras que para el tratamiento con el fungicida el 36.67% alcanzaron un nivel del 25% del síntoma de costra negra. Se observo un mejor desarrollo del cultivo en las parcelas donde se realizó el plan de manejo integrado, evidenciándose más tallos principales que permitieron una mayor producción de tubérculos grandes por planta; estimando un rendimiento comercial que supero en 7 toneladas por hectárea a la parcela tratada solamente con el fungicida pentiopirad.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es producto del Proyecto de investigación “Evaluación de alternativas de manejo integrado sobre *Rhizoctonia solani* Kuhn en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.)” aprobado en el marco de la convocatoria docente 2021 de la Vicerrectoría de Investigaciones e Interacción Social de la Universidad de Nariño.

NOTACIÓN

Yijk = variable de respuesta

μ = media global de todos los tratamientos

Aj = factor a (tratamientos)

Eijk = error experimental.

REFERENCIAS

Ajayi-Oyetunde, O.O., y Bradley, C.A., *Rhizoctonia solani*: taxonomy, population biology and management of *Rhizoctonia* seedling disease of soybean, https://doi.org/10.1111/ppa.12733, Plant Pathology, 67(1), 3–17 (2017)

Ajayi-Oyetunde, O.O., Butts-Wilmsmeyer, C.J., y Bradley, C.A., Sensitivity of *Rhizoctonia solani* to Succinate Dehydrogenase Inhibitor and Demethylation Inhibitor Fungicides, https://doi.org/10.1094/PDIS-07-16-1015-RE, Plant Disease, 101(3), 487–495 (2017)

Arcos, J., y Zúñiga, D., Efecto de rizobacterias en el control de *Rhizoctonia solani* en el cultivo de papa, https://doi.org/10.21704/rea.v14i1-2.86, Ecología Aplicada, 14(2), 95-101 (2015)

Bagri, R.K., y Kanwar, H., Manejo de la Caspa Negra (*Rhizoctonia solani*) de la papa a través de componentes Eco-Amigables, Medio Ambiente y Ecología, 35(4), 2955-2957 (2017)

Ben-Khedher, S., Boukedi, H., Laarif, A., y Tounsi, S., Biosurfactant produced by *Bacillus subtilis* V26: a potential biological control approach for sustainable agriculture development, https://doi.org/10.1007/s13165-020-00316-0, Org. Agr., 10, 117–124 (2020)

Bertuzzi, T., Leni, G., Bulla, G., y Giorni, P., Reduction of Mycotoxigenic Fungi Growth and Their Mycotoxin Production by *Bacillus subtilis* QST 713, https://doi.org/10.3390/toxins14110797, Toxins, 14(11), 797 (2022)

Betancourth, C., Sañudo, B., Flórez, C., y Salazar, G., Eficacia de biofungicidas para el manejo de la costra negra (*Rhizoctonia solani* Kühn) de la papa en Nariño, Colombia, https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000100279, Información Tecnológica, 33(1), 279–288 (2022)

Betancourth, C., Sañudo, B., Flórez, C., y Salazar, G., Manejo de la costra negra de la papa (*Rhizoctonia solani*) con el establecimiento de abonos verdes, https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000200165, Información Tecnológica, 32(2), 165–174 (2021)

Caulier, S., Nannan, C., y otros cuatro autores, Overview of the Antimicrobial Compounds Produced by Members of the *Bacillus subtilis* Group, https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00302, Frontiers in Microbiology, 10, 302 (2019)

Chavarro-Mesa, E., Herrera-Blanco, N., y otros tres autores, Genetic diversity of *Rhizoctonia solaniAG*-3PT, the etiological cause of stem canker and black scurf in Colombian potatoes, https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num3_art:1888, Cienc. Tecnol. Agropecuaria, 22(3), e1888 (2021)

Fira, D., Dimkić, I., y otros tres autores, Biological control of plant pathogens by *Bacillus* species, https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2018.07.044, Journal of Biotechnology, 285, 44–55 (2018)

Fungicide Resistance Action Committee (FRAC), FRAC Code List© 2022. Fungal control agents sorted by cross resistance pattern and mode of action (including coding for FRAC Groups on product labels), https://www.frac.info (2022)

Gikas, G., Parlakidis, P., Mavropoulos, T., y Vryzas, Z., Particularities of fungicides and factors affecting their fate and removal efficacy: A review, https://doi.org/10.3390/su14074056, Sustainability, 14(7), 4056 (2022)

Jayaraman, S., Naorem, A., y otros cinco autores, Disease-Suppressive Soils-Beyond Food Production: a Critical Review, https://doi.org/10.1007/s42729-021-00451-x, Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 21, 1437–1465 (2021)

Khakimov, A., Omonlikov, A., y Ugli, S., Current status and prospects of the use of biofungicides against plant diseases, https://doi.org/10.30574/gscbps.2020.13.3.0403, GSC Biological and Pharmaceutical Sciences, 13(3), 119–126 (2020)

Kotba, I., Achouri, M., y otros cuatro autores, Morphological and Phylogenetic Diversity of *Rhizoctonia Solani* Kühn (Cantharellales: Ceratobasidiaceae) Isolates affecting different hosts plants in Morocco, https://doi.org/10.15414/jmbfs.2020.10.3.461-466, Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology, 24-34 (2020)

Kumar, M., Kumar, J., Kumar, S., y Kumar, A., A comprehensive overview on black scurf of potato, https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.472, International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 6(10), 4981–4994 (2017)

Larkin, R.P., Soil health paradigms and implications for disease management, https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080614-120357, Annual Review of Phytopathology, 53, 199–221 (2015)

Larkin, R.P., Honeycutt, C., y otros cuatro autores, Cumulative and residual effects of different potato cropping system management strategies on soilborne diseases and soil microbial communities over time, https://doi.org/10.1111/ppa.12584, Plant Pathology, 66(3), 437-449 (2017)

Larkin, R.P., y Brewer, M.T., Effects of crop rotation and biocontrol amendments on *Rhizoctonia* disease of potato and soil microbial communities, https://doi.org/10.3390/agriculture10040128, Agriculture, 10(4), 128 (2020)

Muzhinji, N., Woodhall, J.W., Truter, M., y Van der Waals, J.E., Relative Contribution of Seed Tuber and soilborne inoculum to potato disease development and changes in the population genetic structure of *Rhizoctonia solani* AG 3-PT under field conditions in South Africa, https://doi.org/10.1094/PDIS-03-17-0329-RE, Plant Disease, 102(1), 60–66 (2018)

N'Dayegamiye, A.N., Nyiraneza, J., y otros tres autores, The benefits of crop rotation including cereals and green manures on potato yield and nitrogen nutrition and soil properties, https://doi.org/10.4172/2329-8863.1000279, Advances in Crop Science and Technology, 5(3), 279 (2017)

O'Brien, P.A., Biological control of plant diseases, https://doi.org/10.1007/s13313-017-0481-4, Australasian Plant Pathology, 46(4), 293–304 (2017)

Ramírez, J., Carrillo, J.M., Ruiz, M., y Quemada, M., Comparación de gramínea, leguminosa y crucífera para actuar como cubiertas vegetales destinadas a su empleo como abono verde, Actas de Horticultura, 61, 83-89 (2011)

Saini, P.K., Yadav, R.K., y Yadav, G.C., Green manures in agriculture: A review, https://doi.org/10.18805/BKAP142, Bhartiya Krishi Anusandhan Patrika, 34(1), 1-10 (2019)

Selva-Kumar, S., Ram-Krishna, R., y otros tres autores, Biocontrol by plant growth promoting rhizobacteria against black scurf and stem canker disease of potato caused by *Rhizoctonia solani*, https://doi.org/10.1080/03235408.2012.745054, Archives of Phytopathology and Plant Protection, 46(4), 487–502 (2013)

Woodhall, J.W., Lees, A.K., Edwards, S.G., y Jenkinson, P., Characterization of *Rhizoctonia solani* from potato in Great Britain, https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2006.01545.x, Plant Pathology, 56(2), 286–295 (2007)

Wu, Z., Huang, Y., y otros cuatro autores, Biocontrol of *Rhizoctonia solani* via induction of the defense mechanism and antimicrobial compounds produced by *Bacillus subtilis* SL-44 on pepper (*Capsicum annuum* L.), https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02676, Frontiers in Microbiology, 10, 2676 (2019)

Yadav, A.N., Plant Microbiomes for Sustainable Agriculture: Current Research and Future Challenges, in Plant Microbiomes for Sustainable Agriculture by A. Yadav, J. Singh, A. Rastegari, y N. Yadav, Vol. 25, 475–482, Springer Cham., https://doi.org/10.1007/978-3-030-38453-1_16, Cham, Switzerland (2020)

Yossen, V., Rojo, R., y otros seis autores, Effect of Green Manure and Biocontrol Agents on Potato Crop in Cordoba, Argentina, http://dx.doi.org/10.4454/jpp.v93i3.3655, J. Plant Pathol., 93(3), 713–717 (2011)