

**EFFECTO DE LA RESTAURACIÓN VEGETAL SOBRE BACTERIAS SOLUBILIZADORAS DE
FÓSFORO Y POTASIO (PNN LOS NEVADOS)**

**LUISA FERNANDA FORERO RUBIO
LINA SUSANA PÉREZ MORA**

**TRABAJO DE GRADO
Presentado como requisito parcial
para optar por el título de:**

MICROBIÓLOGA INDUSTRIAL

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE MICROBIOLOGÍA INDUSTRIAL**

**Bogotá, D.C.
2 de Junio de 2010**

**EFFECTO DE LA RESTAURACIÓN VEGETAL SOBRE BACTERIAS SOLUBILIZADORAS DE
FÓSFORO Y POTASIO (PNN LOS NEVADOS)**

**LUISA FERNANDA FORERO RUBIO
LINA SUSANA PÉREZ MORA**

Ingrid Schuler García, Ph.D.
Decana Académica

Janeth Arias Palacios, M.Sc.
Directora Carrera de Microbiología
Industrial

**EFFECTO DE LA RESTAURACIÓN VEGETAL SOBRE BACTERIAS SOLUBILIZADORAS DE
FÓSFORO Y POTASIO (PNN LOS NEVADOS)**

**LUISA FERNANDA FORERO RUBIO
LINA SUSANA PÉREZ MORA**

**Amanda Varela, Ph.D.
Bióloga, Microbióloga
Directora**

**Edna Viviana Gutiérrez
Microbióloga Industrial
Jurado**

NOTA DE ADVERTENCIA

Artículo 23 de la resolución No. 13 de Julio de 1946:

“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y por que las tesis no contengan ataques personales contra persona alguna, antes bien se vea en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia”.

RESUMEN

En el presente estudio se realizó un análisis microbiológico de un suelo afectado por un incendio forestal, que está siendo tratado por medio de restauración ecológica (activa y pasiva) ubicado en el PNN, en el departamento de Risaralda, con el fin de conocer los efectos que tienen los tratamientos de restauración sobre la densidad microbiana de bacterias solubilizadoras de fósforo y potasio, dos años después de comenzar los procesos de restauración, considerando un control como suelo de una zona no incendiada ni restaurada. Además se efectuaron análisis fisicoquímicos para determinar el porcentaje de materia orgánica, la distribución de agregados, la textura, la conductividad, el pH y el porcentaje de humedad. Los resultados obtenidos mostraron que aunque la densidad de las bacterias solubilizadoras de fósforo estaba en el mismo orden de magnitud bajo la restauración activa, pasiva y el control, en la restauración activa se presentó una menor densidad. Por otro lado al evaluar la densidad de las bacterias solubilizadoras de potasio se encontró mayor densidad en la restauración activa que en la pasiva. Igualmente en este estudio se observó que dentro de las propiedades fisicoquímicas la cantidad de macroagregados de 600 μm y 300 μm fue mayor en la restauración activa y en la época seca, mientras que la humedad fue mayor en la restauración pasiva. Adicionalmente la conductividad y la textura presentaron diferencias estadísticamente significativas aunque estos valores no son biológicamente relevantes. Asimismo se determinó que las propiedades fisicoquímicas que explicaron la densidad de las BSP son los macroagregados de 1,18 mm y la conductividad además de verse influenciada a su vez por la densidad de las BSK; la densidad de las BSK no se vio influenciada por los parámetros fisicoquímicos evaluados, por lo que sería necesario evaluar otras propiedades del suelo. En síntesis se puede decir que los tratamientos de restauración ejercen un efecto positivo sobre las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del suelo evaluadas, además sería necesario realizar posteriores valoraciones para determinar cuál de los dos tratamientos permite restablecer más pronto la recuperación de los componentes básicos del ecosistema (estructura, función y composición de especies) y en particular del suelo. También es importante buscar los parámetros fisicoquímicos que afectan la densidad de las BSK como la concentración de microelementos Mg, Ca y Na.

INTRODUCCIÓN

Eventos como los incendios forestales producen cambios importantes en la estructura de los ecosistemas donde se presentan, dependiendo principalmente de la magnitud e intensidad con la que se hayan manifestado (Martínez *et al.*, 1991). Alteran de manera drástica las propiedades físicas, químicas y microbiológicas especialmente del suelo, lo que conlleva a la erosión y degradación de este, produciendo un desequilibrio general en todo el ecosistema (Vega, 2007).

Para recuperar de alguna manera el estado original de estos ecosistemas se utilizan estrategias como la restauración ecológica, donde se busca imitar la estructura, diversidad, función y dinámica del ecosistema original que se quiere restaurar, implementando la introducción de algunas especies o simplemente monitoreando los cambios que sucedan cuando los impactos generados sean fáciles de superar (Gálvez, 2002; Vargas, 2007).

Los microorganismos que se encuentran en los suelos degradan la materia orgánica, y por ende participan en el ciclaje de los nutrientes, dan soporte a los agregados del suelo y contribuyen con el crecimiento vegetal (Sáenz, 2006). Adicionalmente son sensibles a los cambios que se generan en el medio en el que se desarrollan y por lo tanto ante un disturbio o una intervención su densidad poblacional y actividad suelen variar (Martínez *et al.*, 1991; Mataix, 2000; Gelvez, 2008).

Teniendo en cuenta estas referencias la propuesta de este estudio es la de realizar la evaluación de las poblaciones bacterianas solubilizadoras de fósforo y potasio de un suelo afectado por un incendio forestal, que se encuentra ubicado en el PNN Los Nevados y que está siendo tratado por medio de restauración ecológica (activa y pasiva), con el fin de establecer así cuál de estos tipos de restauración es más efectivo para la recuperación de este suelo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia, conocido como un país rico en diversidad cultural y biológica ante el mundo, posee una gran variedad de suelos fértiles en todo su territorio, que por sus características físicas y químicas, son capaces de soportar en gran medida los disturbios generados por la incesante actividad humana, como los incendios forestales. Sin embargo por el aumento de estas actividades, los cambios climáticos, el desconocimiento frente al tema y la indiferencia del hombre ante estos sucesos, la resistencia que presentan estos suelos ha sido afectada casi en su totalidad, lo que impide su recuperación y conservación. Los páramos colombianos y en particular los ubicados en el Parque Nacional Natural los Nevados, situados en el Departamento de Risaralda, han sufrido incendios forestales, que han disminuido notablemente no sólo la fertilidad de sus suelos sino también la flora y la fauna que conforman uno de los ecosistemas más importantes de este sitio.

En julio del 2006 se presentó un incendio en dicho Parque, específicamente en la Laguna del Otún, Lomabonita, la Leona, Bagaseca y el Bosque, abarcando cerca de 2400 ha, que cubren sectores de pajonales, frailejones, turberas y matorrales, en zonas de productos de bienes y servicios para este Departamento. Esto implicó una incalculable pérdida económica y ecológica. Por otra parte el cambio de gran parte de estos suelos a nivel biológico (macro y micro fauna y vegetación) especialmente el de la Laguna del Otún, junto con factores como cambios climáticos y la deforestación, hacen que los recursos hídricos disminuyan, afectando no sólo a los animales sino también a los pobladores que habitan allí cerca.

La preocupación ante este suceso, reunió a entidades como la CARDER, Corpocaldas, Cortolima, CRQ, Aguas y Aguas de Pereira, Alcaldía de Santa Rosa, Universidad Tecnológica de Pereira, WWF, PNN de Colombia y el Ministerio de AVDT, formando un comité que propuso actividades como la restauración de las zonas afectadas (principalmente el sector de la Laguna del Otún), por medio de la introducción de flora y fauna típica, la mitigación del pastoreo y el control y la vigilancia de todas las acciones allí realizadas. Estas actividades han venido realizándose desde entonces y han logrado en gran medida la recuperación de algunos factores como la cobertura de los páramos y la reintegración de algunas especies. No obstante sabiendo que el proceso de restauración ecológica que se busca implementar para la total recuperación de estas zonas es lento, se requiere de mucho más tiempo, cuidado e investigación para evitar que este ecosistema se convierta en una zona de baja productividad y que los recursos hídricos se vean drásticamente afectados. Se debe tener en cuenta que se desconoce el funcionamiento de los procesos llevados a cabo en la implementación de la restauración sobre los grupos funcionales microbianos edáficos del suelo.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el efecto de la restauración activa y pasiva sobre la densidad de las bacterias solubilizadoras de fósforo y potasio?

JUSTIFICACIÓN

Para tratar de mantener el equilibrio biológico existente en los suelos de los páramos, especialmente en el suelo del páramo de la Laguna del Otún, es importante evaluar en qué medida un disturbio como el incendio ocurrido en este lugar y la restauración de la vegetación implementada posteriormente, pueden afectar propiedades importantes de la composición del suelo y del funcionamiento del mismo, como los grupos funcionales microbianos, que permiten la disponibilidad de nutrientes para el desarrollo de las plantas. Además evaluar qué impacto pueden generar los procesos de restauración ecológica (pasiva y activa) sobre la densidad de grupos funcionales microbianos, especialmente las bacterias solubilizadoras de fósforo y potasio que se encuentran allí, ya que contribuyen en gran medida dentro de los ciclos de nutrientes y por tanto a la recuperación de las características biológicas y químicas.

En cuanto a las características biológicas se encuentra el ciclaje del fósforo y el potasio por parte de las poblaciones microbianas a partir de la solubilización de estos por medio de la producción de ácidos o enzimas dando como resultado formas de fósforo y potasio inorgánico que se encuentran disponibles observándose la producción de complejos con iones de diferentes metales que mejoran la disolución de los ligandos formados para su posterior asimilación por parte de las plantas influyendo en su crecimiento. Por otro lado en las características químicas se halla la disponibilidad de fósforo y potasio en suelo, cambios de pH, conductividad y reservas de fósforo y potasio en los agregados del suelo de este ecosistema afectado.

MARCO TEÓRICO

En Colombia al igual que en otros países los problemas ambientales se han incrementado debido al uso indiscriminado de los recursos naturales y la transformación de los ecosistemas por disturbios como el uso agropecuario, la tala, incendios forestales, erosión laminar y en surco, entre otros (Barrera, 2005). Un ejemplo de esto se observa en la vegetación de los páramos de Colombia y Ecuador que está siendo intervenida por las prácticas ganaderas y el uso de fuego para mejorar la calidad del forraje (Premauer, 2004). Al ser disturbado un ecosistema por un incendio se obtiene un área con pérdida total o parcial de sus funciones en cuanto a la productividad, las interacciones, regulación hídrica y su estructura, entre otras (Barrera-Cataño, 2007). En el caso de la flora el componente aéreo se mineraliza por el efecto de la carbonización a altas temperaturas, afectando las vías de forrajeo y las vías detriticas dependientes de la necromasa, asimismo, la fauna se ve afectada dando como resultado la muerte de los individuos por el efecto del calor y el humo, o la migración de los sobrevivientes. Del mismo modo el suelo al ser un agregado complejo de elementos químicos, físicos y biológicos que permite el desarrollo de la vida, se ve afectado dependiendo del grado de profundidad del incendio.

La diferente proporción de los componentes que existen en el suelo le atribuyen a estas características de gran importancia, permitiendo que funciones como la degradación, mineralización e inmovilización de la materia orgánica y de nutrientes se lleve a cabo. Estas características son conocidas como propiedades físicas, químicas y biológicas, que al conjugarse dan paso a interacciones que permiten el desarrollo de plantas y organismos que darán estructura y funcionalidad al suelo. El efecto generado de estas propiedades sobre los microorganismos que allí habitan se ven reflejados en factores como su densidad poblacional y actividad enzimática haciendo que estas aumenten o disminuyan drásticamente. Un ejemplo de esto, es el porcentaje de la materia orgánica y la temperatura presentes en el suelo, ya que permite el aumento o la disminución del metabolismo de estos microorganismos, para producir ácidos que afectan el pH, lo que a su vez modifica la solubilización de nutrientes que aportan a su propio crecimiento y al crecimiento de otros organismos y plantas (Acuña, 2006; Torres, 2006).

La capacidad del ecosistema de realizar los procesos básicos de transferencia de energía, nutrientes, agua y CO₂ se define como función (Hobbs *et al.*, 1995). Las funciones a su vez se dividen en procesos secundarios del ecosistema, generando interacciones de todo tipo que permiten el ciclaje de la mayoría de los nutrientes (C, N, P, S, K, entre otros). Esto se lleva a cabo por medio de la degradación de la materia orgánica e inorgánica allí presente, que permite el crecimiento de cultivos y el desarrollo general de la vida (Carrillo, 2003), dando como resultado producciones secundarias, descomposición, ciclo de nutrientes, almacenamiento de agua, desarrollo, fertilidad del suelo y perturbación.

Sin embargo, se hace necesario agrupar las especies según las características taxonómicas, morfológicas, fisiológicas y atributos fenológicos (relacionados con el tamaño de la planta y uso de recursos) para averiguar los efectos de la diversidad de las especies en el funcionamiento del ecosistema, además de permitir las comparaciones entre estos; motivo por el cual, las especies son clasificadas en grupos funcionales (Walker, 1992). Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, un grupo funcional se define como un conjunto de especies relacionadas filogenéticamente que realizan la misma función y exhiben respuestas similares a las condiciones

ambientales; sin embargo cabe resaltar que las características utilizadas para clasificar las especies en grupos funcionales dependerán del tipo de ecosistema y del objetivo de estudio (Walker, 1995; Díaz y Cabido, 1997).

Los microorganismos del suelo pueden ser clasificados en grupos funcionales de acuerdo a los procesos biológicos que realizan, entre los cuales se encuentran los proteolíticos, amilolíticos, celulolíticos, pectinolíticos, solubilizadores de potasio, solubilizadores de fósforo y fijadores de nitrógeno (Torsvik, 2002). Esta diversidad microbiana está directamente relacionada con la estabilidad del ecosistema, lo cual sugiere que para mantener la continuidad de los procesos biológicos, si no existe una especie determinada que realiza algún ciclo bioquímico debe estar otra que cumpla con la misma función (Kennedy, 1999).

Grupos funcionales como bacterias solubilizadoras de fósforo y potasio son relevantes a la hora de hacer un estudio de suelos, ya que liberan y aportan, por medio de distintos mecanismos (solubilización por ácidos orgánicos y producción de enzimas) elementos (P y K) y productos secundarios que son fundamentales para el crecimiento, desarrollo de plantas y organismos en un ecosistema (Stevenson, 1999; Vázquez, 2000; Rodríguez, 1999; Sáenz, 2009). Además se observa la participación de los elementos liberados en procesos de formación de carbohidratos, proteínas, ATP, fosfolípidos y ácidos nucleicos, así como la intervención durante la fotosíntesis, procesos de turgencia celular y regulación de la presión osmótica, por último se resalta su participación en la producción de la mayoría de fertilizantes y biofertilizantes, dando como resultado una mayor importancia de los grupos funcionales estudiados (Stevenson, 1999; Bobadilla 2008; Alexander, 1980). Según Moratto, *et al.*, 2005, Sivila *et al.*, 1994 y Sáenz, 2009 los grupos funcionales microbianos pueden ser usados dentro de los ecosistemas como indicadores de calidad de suelos, pues las concentraciones altas o bajas de nutrientes además de la variación de otros factores fisicoquímicos (pH, humedad, conductividad, etc.) afectan su densidad y por lo tanto su actividad, lo que se relaciona directamente con el desarrollo de organismos como las plantas.

Si se altera la estabilidad del ecosistema en el que se encuentran estos microorganismos, por disturbios (incendios forestales) son afectados en su densidad y actividad, lo que genera cambios en las interacciones que se producen sobre la materia orgánica y los nutrientes del suelo, disminuyendo características importantes como la fertilidad y la diversidad de especies que habitan allí. Esto conlleva a la pérdida de recursos no sólo ecológicos sino también económicos que afectan gravemente a las comunidades dependientes de este ecosistema (Vargas, 1997).

Por otra parte cuando se intenta restablecer la organización y el funcionamiento de un ecosistema disturbado se habla de restauración ecológica. Esta hace referencia al proceso en el cual se sistematizan acciones a corto, mediano y largo plazo para una recuperación no de la totalidad del ecosistema sino de los componentes básicos en cuanto a la estructura, función y composición de especies de este, como si no hubiera sido afectado por ningún tipo de perturbación. Razón por la cual la restauración es un proceso integral de visión ecosistemática tanto local, como regional y del paisaje, teniendo en cuenta las necesidades humanas y la sostenibilidad de los ecosistemas naturales, seminaturales y antrópicos (Montes, 2002; Vargas, 2007).

Para el establecimiento de una restauración ecológica, es necesario tener en cuenta tanto los parámetros como las formas básicas de hacerlo. En cuanto a parámetros se requiere realizar un diagnóstico del área afectada, luego establecer los factores tensionantes y limitantes, la búsqueda de sistemas de referencia y por último la selección de la forma en que se va a realizar (Barrera *et al.*, 2007). Existen tres formas básicas para la realización de esta: la primera se conoce como recuperación, en la que se busca cubrir de vegetación el suelo afectado con especies apropiadas, la segunda se conoce como rehabilitación, donde se usa una mezcla de especies nativas y exóticas para recuperar el área afectada y la tercera y más importante por su uso a nivel mundial, es la restauración, en esta se restablece el conjunto original de animales y plantas con poblaciones aproximadas a las iniciales (Gálvez, 2002). Existen dos clases de restauración: pasiva cuando en un ecosistema degradado se eliminan los factores tensionantes o los disturbios y este es capaz de

restaurase solo, y activa donde se necesita efectuar estrategias para lograr la recuperación en diferentes fases y superar las barreras que impiden la regeneración (Vargas, 2007).

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la restauración activa y pasiva sobre la densidad de las bacterias solubilizadoras de fósforo y potasio edáficas, además de la influencia de las propiedades fisicoquímicas del suelo sobre estas mismas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Cuantificar la densidad de las bacterias solubilizadoras de potasio y fósforo presentes en cada una de las muestras de suelo que representan los dos tipos de restauración (activa y pasiva) y el control.

Determinar cambios en algunas características (pH, conductividad, materia orgánica, textura, distribución de los agregados y humedad) del suelo bajo cada clase de restauración.

Establecer la relación existente entre la densidad de las bacterias solubilizadoras de potasio y fósforo y las propiedades fisicoquímicas que presenta el suelo bajo los dos tratamientos.

METODOLOGÍA

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO. El PNN los Nevados se encuentra ubicado geográficamente en la Cordillera Central de los Andes Colombianos. Comprende un área aproximada de 58.300 ha, con alturas entre los 2.600 y 5.321 msnm y hace parte de las 53 áreas protegidas del territorio nacional. Está constituido por tres grandes ecosistemas: páramo, sistema de nevados y bosques altoandinos, siendo el páramo el ecosistema más representativo dentro del Parque con aproximadamente 38.600 ha, compuesto por pajonal, turbera, lagunas y arbustal denso, presenta temperaturas que oscilan entre los 6 y los 10°C, una precipitación promedio anual de 1500 y 1750 mm y un periodo de lluvias altas entre el mes de abril y mayo y bajas en el mes de octubre. El 5 de julio del 2006 en el PNN los Nevados ocurrió un incendio forestal que involucró cerca de 2400 ha de páramo en el sector de la laguna del Otún, La Alsacia, El Silencio, Loma bonita, Bagaseca y Laguna La Leona.

En los sectores afectados por este incendio se implementaron tratamientos de restauración ecológica. En las parcelas donde se realizó la restauración activa (RA) se utilizó la adición de semillas, siembra de plántulas de herbáceas y de arbustos, núcleos de regeneración y traslado de cespiones, mientras en la restauración pasiva (RP) se espera que el ecosistema sea capaz de restaurarse sólo eliminando los factores tensionantes ocasionados después del disturbio. La zona empleada como control no presentó alteración alguna y los valores encontrados en esta área se toman como los valores necesarios para llevar a cabo la restauración del ecosistema. Para este estudio, dos años después de haberse implementado los tratamientos de restauración, se tomaron 18 muestras de suelo, en cada una de las 12 de parcelas con restauración activa y pasiva en páramo y en seis utilizadas como control, ubicadas en zonas cercanas al albergue del Parque, en inmediaciones de la laguna del Otún.

VARIABLES DE ESTUDIO. La variable independiente de este estudio está dada por los tratamientos de restauración activa, restauración pasiva y el control. Por otro lado, las variables dependientes son la densidad de las bacterias solubilizadoras de potasio (BSK) y las bacterias solubilizadoras de fósforo (BSP) y las características fisicoquímicas del suelo (pH, conductividad eléctrica, humedad, distribución de agregados, textura).

MUESTREO. Se realizaron dos muestreos durante los cuales se recolectaron muestras de suelo afectado por el incendio donde se realizaron los tratamientos de RA y RP y muestras de suelo que no fueron alcanzados por este ni tenían implementados procesos de restauración (controles). Se seleccionaron seis sectores de manera aleatoria (dos por cada tipo de restauración incluyendo el

control), dentro de los cuales se seleccionaron tres parcelas, cada una con un área de 10 x 5 m y una distancia entre ellas de mínimo 70 m. En cada parcela se recolectaron muestras de suelo con una profundidad de 0-20 cm. Cada una de estas muestras estuvo compuesta por cinco submuestras tomadas en forma de zigzag, con una distancia de separación entre ellas de 5 m (NTC 4113-1,2 1997). En total se obtuvieron 18 muestras, las cuales se almacenaron a 4°C hasta su procesamiento en el laboratorio, con el objetivo de no modificar ninguna de las características físicas, químicas y biológicas.

PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS. Inicialmente se realizaron diluciones seriadas hasta 10^{-4} para llevar a cabo la estandarización de las diluciones a utilizar en este estudio, en donde se tomaron 10 g de cada muestra de suelo y se suspendieron en 90 ml de solución salina al 0,85%(p/v). Posteriormente se efectuó una siembra en profundidad de cada una de las diluciones, por triplicado, en los medios selectivos Picovskaya (Pikovskaya, 1948) para BSP y Alejandrov modificado para BSK (Sáenz, 2009; Hu, *et al.* 2006). Estas cajas fueron llevadas a incubación a 15°C por 7 días. Pasado este tiempo se realizaron los recuentos de BSP y BSK en las cajas sembradas con las diluciones en donde este se encontró entre 30-300 UFC/g de las colonias características de los grupos microbianos estudiados. De esta manera se escogió solamente una dilución para establecer la densidad de los grupos funcionales de todas las muestras, con el mismo procedimiento mencionado anteriormente.

PRUEBAS FÍSICOQUÍMICAS. Conductividad eléctrica. Según la densidad real (peso de suelo seco dividido por el volumen del mismo) de la muestra (g/ml), se adicionó el peso equivalente a un volumen de 30 ml. Seguidamente, se agregó un volumen igual de agua desionizada. Se agitó por 5 min a 150 rpm en un agitador mecánico. Con las partículas aún suspendidas en la solución se insertó el medidor del conductímetro (HACH Sension 2) y se realizó la lectura a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, permitiendo que esta se estabilizara por 10 seg (Andrades, 1996; USDA, 1999).

Humedad. Se pesaron 5 g de suelo fresco de cada muestra, los cuales fueron llevados a un horno a 105°C por 24 h. Después de este tiempo se registró el peso de suelo seco ($\pm 0,001\text{g}$) y se realizó el cálculo de porcentaje de humedad por medio de la ecuación empleada en el documento de Andrades, 1996 y Pikul, 2003.

Distribución de agregados del suelo. Se tomó la muestra de suelo con un cilindro metálico (5x6x7 cm aprox.). Se pesó, se dejó secar por 3 días a temperatura ambiente y posteriormente se registró el peso después del secado. En la parte superior de una torre de tamices se colocó la muestra y se dejó por 5 min a 800 rpm. Por último, la fracción de suelo encontrada en cada uno de los tamices (1,18 mm, 600 μm , 300 μm , 54 μm y <54 μm) se pesó y se halló el porcentaje de macro y microagregados obtenidos en cada una de las muestras (Andrades, 1996).

Textura. Se secaron 25 g de suelo fresco de cada muestra a temperatura ambiente por 24 h. Después de este tiempo se depositó el suelo seco en frascos con 5 ml de solución dispersante (3,75% de tripolifosfato de sodio y 0,75% de carbonato de sodio) y 60 ml de agua destilada. Posteriormente se agitó y se dejó reposar 24 h. Consecutivamente se aforó con agua destilada hasta 250 ml, se agitó fuertemente durante 2 min y se pasó esta suspensión a una probeta de 250 ml; para realizar la primera lectura de densidad (C1). Esta primera lectura fue la densidad de la suspensión de arcilla + limo. Se dejó sedimentar por 1 h el procedimiento anteriormente descrito y se tomó la segunda lectura de densidad (C2) la cual corresponde a la densidad de la suspensión de arcilla. Por último se establecieron los porcentajes de cada uno de los componentes del suelo según las fórmulas descritas por Bouyoucos y se ubicaron en el triángulo de textura para determinar la clase textural a la que corresponde el suelo analizado (Cooper, 1982; Norambuena *et al.*, 2002).

pH. Se tomaron 10 g de suelo y 10 ml de agua desmineralizada. Se agitó durante 5 min en un agitador mecánico y se dejó reposar por 30 min. Inmediatamente antes de la lectura se volvió a

agitar, se determinó el pH indicado por el potenciómetro (HACH Sension 2) y se realizó la lectura a una temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ (Andrades, 1996).

Materia orgánica: Se tomaron 5 g de suelo para cada muestra, se colocaron en el horno a 80°C durante 48 h. A continuación se depositó el suelo seco de cada muestra en un crisol previamente pesado y se registró el peso resultante. Luego se colocó en la mufla a 550°C por 2 h, se pesó nuevamente el suelo y en último lugar se realizó el cálculo del porcentaje de pérdida de peso por ignición (PPI) (Dean, 1974; Faitfull, 2005).

Análisis estadístico. Se utilizó el contraste de normalidad de Shapiro-Wilks, con el fin de determinar si los datos presentaban una distribución normal y posterior a esto se efectuó una prueba de homogeneidad de varianzas (Levene). Se realizó un ANOVA de dos vías para establecer si existían diferencias significativas de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos entre los tratamientos de restauración y entre las épocas climáticas. Adicionalmente para explicar la influencia de estos parámetros sobre el comportamiento de los grupos funcionales evaluados se utilizó una regresión lineal múltiple por pasos. Para todas las pruebas estadísticas se usó un nivel de significancia igual a 0,05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

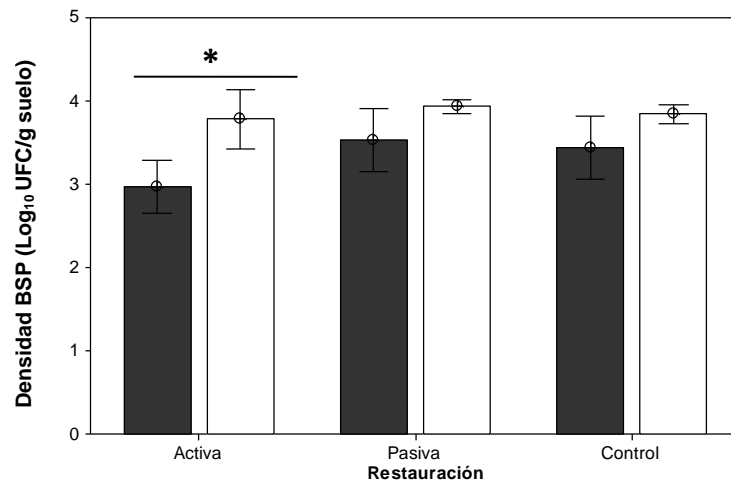
Los resultados obtenidos en el presente estudio no presentaron interacciones entre los tratamientos de restauración evaluados y las épocas climáticas; por lo tanto el análisis de cada uno de estos factores se realizó por separado.

Los tratamientos de restauración utilizados presentaron cambios tanto en cuanto a la densidad de los grupos funcionales evaluados como en las propiedades fisicoquímicas del suelo. Se encontró que el promedio de las BSP en el suelo bajo RA, RP y el control estuvieron en el orden de $4,4\cdot 10^3$ UFC/g suelo, $6,9\cdot 10^3$ UFC/g suelo, $5,5\cdot 10^3$ UFC/g suelo, respectivamente (Figura 1). Presentándose menor densidad en la RA con respecto a la RP y el control ($F=4,259$, $P= 0,024$), posiblemente porque al haber una introducción de vegetación en un suelo disturbado, las bacterias presentes no puedan colonizar el suelo en el que se encuentren las raíces de estas plantas por la presencia de exudados que inhiban su crecimiento o que no aporten nutrientes para el crecimiento de estas (Sivila *et al.*, 1994). Los órdenes de magnitud de densidad microbiana registrados en este estudio son bajos en comparación con los registrados en un estudio en el páramo Guerrero ($2,2\cdot 10^7$ UFC/g de suelo) ubicado en Zipaquirá, Colombia donde se evaluó la densidad de microorganismos presentes en zonas con descanso. Posiblemente esto se deba a que en el páramo Guerrero por adición de hojarasca para la protección de los suelos durante las épocas de descanso, los valores de materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes aumentó, permitiendo mayor crecimiento de los microorganismos. Además en el mismo estudio se reportaron aislamientos de los géneros *Pseudomonas*, *Staphylococcus*, *Bacillus* y *Micrococcus* con actividad solubilizadora de fosfatos, géneros que posiblemente también se pueden encontrar en los suelos del presente estudio, dado que pertenecen al mismo ecosistema y son ubicuos (Bernal *et al.*, 2006). En contraste en el estudio realizado en el páramo El Granizo (Bonilla, 2005), la densidad de BSP que se presentó ($8,8\cdot 10^5$ UFC/g) fue dos órdenes de mayor magnitud a la registrada durante este estudio.

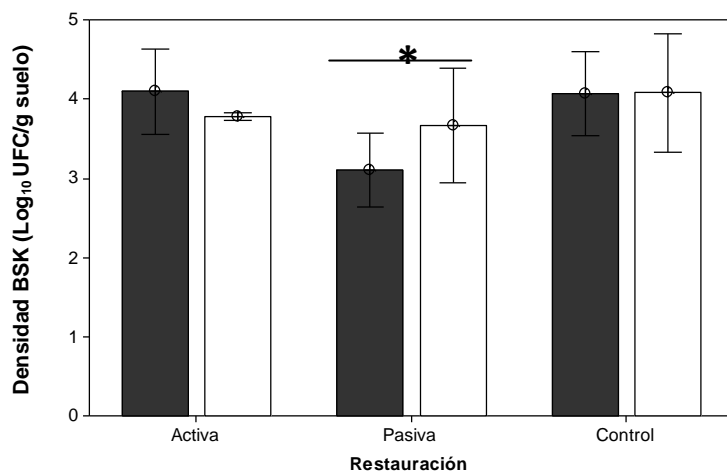
En cuanto a la comparación entre las épocas climáticas se obtuvo una mayor densidad ($F=39,648$, $P= 0,000$) en la época seca con respecto a la época de lluvia ($7,7\cdot 10^3$ UFC/g suelo; $3,5\cdot 10^3$ UFC/g suelo, respectivamente). Esto posiblemente se deba a que al aumentar la temperatura, la humedad relativa del suelo desciende haciendo que los nutrientes que se encuentran en la solución se concentren, facilitando así que los microorganismos los utilicen, lo que se ve reflejado en el aumento de su densidad; además el incremento de temperatura beneficia el metabolismo de microorganismos activándolos (Sáenz, 2006; Mataix- Solera *et al.*, 2000; Santos, 2007).

Asimismo al evaluar la densidad de las BSK se encontró que la densidad de estas estuvo en el orden de $1,3 \cdot 10^4$ UFC/g suelo en RA, $6,4 \cdot 10^3$ UFC/g suelo en RP y $3,9 \cdot 10^4$ UFC/g suelo en control (Figura 2). Esta densidad bajo RA fue mayor con respecto a los valores de la RP ($F=5,63$, $P=0,008$), posiblemente porque al introducir vegetación en un suelo degradado condiciones como la cantidad de materia orgánica, la conductividad, el pH y la distribución de agregados favorecen el crecimiento de estas bacterias, aportando nutrientes y mejorando la capacidad de solubilización (Mataix- solera *et al.*, 2000; Moratto *et al.*, 2005). La densidad de estas bacterias es baja con respecto a la reportada (10^8 células/ml) en cultivos de pimienta y pepino en China y Japón (Han *et al.*, 2006), pues a pesar de no ser el mismo ecosistema ni estar bajo las mismas condiciones es uno de los pocos estudios que reporta su densidad, ya que es un grupo funcional que hasta ahora se está estudiando. En este mismo estudio reportan que *Bacillus mucilaginosus* es la bacteria con mayor capacidad de solubilización de potasio y que se encuentra ampliamente distribuida en el suelo, lo que indica que posiblemente también se pueda encontrar en el suelo de páramo evaluado durante este estudio.

Al encontrarse diferencias significativas en las densidades de los grupos funcionales entre los tratamientos y el control, se plantea que esto pudo haber sucedido posiblemente por la influencia de la introducción de vegetación, donde parámetros fisicoquímicos como los evaluados en este estudio, generalmente aumentan, mejorando la retención de agua, nutrientes, la estructura y la conductividad del suelo (Mataix- Solera *et al.*, 2000; Moratto *et al.*, 2005; Hamman *et al.*, 2008; Sivila *et al.*, 1994).



(a)



(b)

Figura 1. Promedio \pm desviación estándar de la densidad de las (a) BSP y (b) BSK en las dos épocas climáticas, bajo los tratamientos de restauración y control. La barra negra corresponde a la época de lluvia y la blanca a la época seca. El * indica diferencias significativas ($P < 0,05$).

La materia orgánica del suelo experimenta diferentes transformaciones tanto cualitativas como cuantitativas en función a la intensidad del fuego, dando como resultado diferentes repercusiones ecológicas. Es un componente esencial del suelo que mejora significativamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo, aumentando la estabilidad de la estructura que se ve reflejada en los agregados (Mataix-Solera, 2000). Está compuesta por gran cantidad de nutrientes (C, N, P, K, entre otros) en diferentes concentraciones, que pueden verse afectados por diferentes factores como la temperatura, humedad, época climática, entre otros (Llambí *et al.*, 1998). Para esta variable los valores obtenidos durante el estudio se encontraron entre el 12,06 y el 18,35%, que son valores altos, según lo reportado por Fassbender, Bornemiza (1987) y la USDA (1999), ya que se encuentran entre el rango reportado por estos (8 - >15%). Al comparar los resultados obtenidos con respecto a otros estudios se puede decir que se encuentran entre los valores registrados para otros páramos. Entre ellos están los mencionados en el estudio realizado por Avellaneda-Cusarúa (2006) en el páramo de Chontales en Boyacá, quien registró un 14,14% de materia orgánica en parcelas no intervenidas y el estudio de Limas (2002) realizado en el páramo La Cumbre donde se encontraron valores de materia orgánica entre 11,35%-32,68%.

Asimismo el porcentaje de materia orgánica no presentó diferencias significativas entre la RP, RA y el control ($F = 0,06$, $P = 0,940$). Posiblemente esto se debió a que los efectos residuales del incendio no causaron gran impacto, ya que la combustión de la materia orgánica trasciende negativamente sobre las características edáficas del suelo una vez haya ocurrido el incendio. Adicionalmente tras el efecto de una intervención como la restauración ecológica se restablece su funcionalidad original, influyendo de manera positiva sobre esta propiedad, ya que se deriva de los residuos de material vegetal (Hamman *et al.*, 2008; Mataix-Solera, 2000). Por otro lado en el estudio de Limas (2002) se determinó que el porcentaje de esta propiedad en periodos largos o cortos de descanso aumenta, sin embargo se observa que al haber introducido vegetación o permitir el descanso prolongado no varían los resultados obtenidos en esta propiedad con respecto a los valores del control.

Por otro lado los valores de materia orgánica en un ecosistema como el páramo son altos, debido a que la descomposición se lleva a cabo a tasas bajas, por la baja temperatura y la alta humedad representativa del páramo. En este estudio se registraron valores más altos de materia orgánica en la época seca que en la época de lluvia ($F = 8,14$, $P = 0,008$); 15,99% en época seca y 14,46% en época de lluvia. Esto posiblemente pudo deberse a la disminución de la concentración de nutrientes de una época a otra; sin embargo esta diferencia no es biológicamente importante por lo

que un microorganismo puede crecer y proliferar si tolera los cambios de presión osmótica; lo que es observado en las bacterias promotoras del crecimiento vegetal, siendo una cualidad importante en ecosistemas como el páramo, en donde el estrés hídrico es un factor limitante de la diversidad microbiana del suelo (Mora-Osejo, 1995). Un ejemplo de esto se observa en las especies del género *Bacillus* que gracias a la endoespora que poseen tienen la capacidad de tolerar condiciones adversas (Atrih, Foster, 1994). Además al presentarse un incremento de la temperatura en un suelo húmedo o con una humedad relativa alta como el que posee el área de estudio, los efectos sobre la transformación y el ciclaje de los nutrientes por parte de los microorganismos van a ser pocos, pues el agua presente actúa como amortiguador, absorbiendo gran cantidad de la energía térmica generada. Sin embargo se debe tener en cuenta que la pérdida de humedad del suelo puede ocasionar modificaciones químicas haciendo más mineralizable la materia orgánica (Hamman *et al.*, 2008; Mataix-Solera, 2000).

Al mismo tiempo los agregados, son otro factor importante para evaluar la distribución de la materia orgánica en el suelo de páramo. En este estudio se encontraron diferencias significativas en la cantidad de agregados de 600 μm y 300 μm (Figura 2) en la RA (23,81%, $F= 4,89$, $P= 0,014$; 20,54%, $F= 3,91$, $P= 0,031$, respectivamente), posiblemente porque la introducción de vegetación y el descanso o la no intervención en este suelo de páramo evaluado parece tener una influencia sobre la distribución de los agregados, porque al quedar desprotegido el suelo (sin vegetación), factores climáticos como la lluvia y el viento destruyen o disminuyen la resistencia de la estructura de estos, aumentando las pérdidas de materia orgánica además de disminuir la capacidad de retención del agua (Mataix-Solera, 2000; Sivila *et al.*, 1994; Sáenz, 2006; Betancourt *et al.*, 1999).

Se presentaron a la vez diferencias significativas de acuerdo a la época climática, donde se registraron mayores proporciones de agregados de 1,18 mm en la época seca y una disminución en la cantidad de los agregados de 600 μm , 300 μm , 54 μm y < 54 μm para esta misma, mientras que en la época de lluvia se registró todo lo contrario ($F= 26,57$, $P= 0,000$; $F= 29,23$, $P= 0,000$ para macro y microagregados, respectivamente). Esto posiblemente se debe a que las características de la lluvia interactúan con las condiciones tanto superficiales como subsuperficiales del suelo, donde la dinámica hídrica edáfica es afectada por la estabilidad de la estructura del suelo debido al fenómeno de sellamiento superficial (Chagas, 1995).

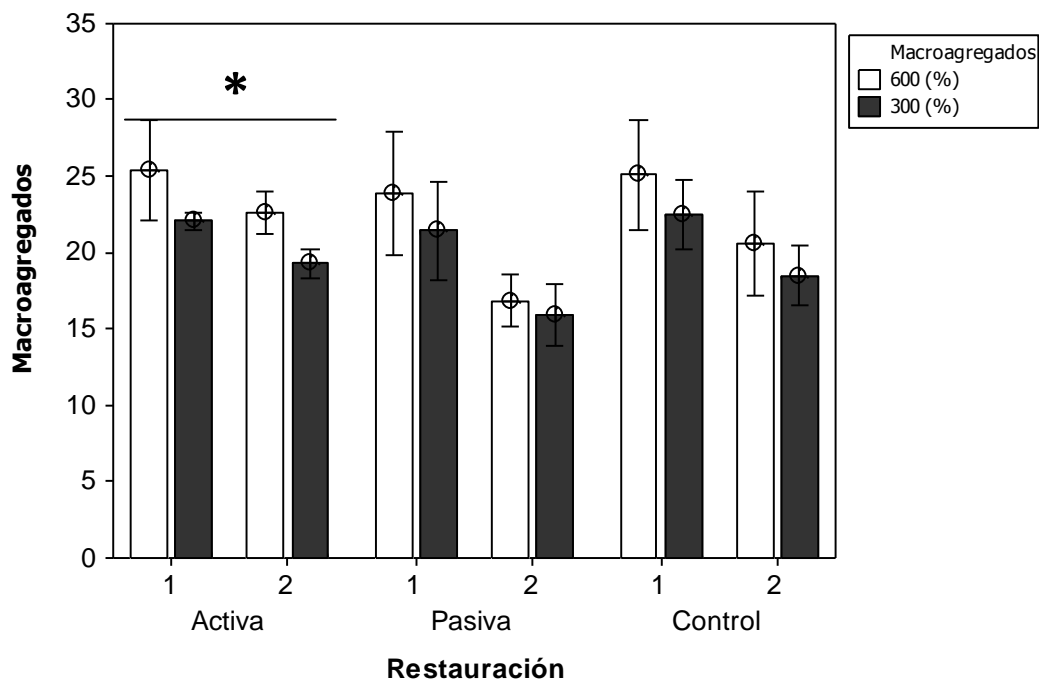


Figura 2. Promedio \pm desviación estándar del porcentaje de macroagregados de tamaño de 600µm y 300µm en las dos épocas climáticas, bajo los tratamientos de restauración y control. 1 y 2 corresponden a las épocas climáticas, El * indica diferencias significativas ($P < 0,05$).

Al introducir vegetación sobre un suelo disturbado se ve protegida la estructura de este (Mataix-solera *et al.*, 2000) generando un menor impacto sobre las pérdidas de materia orgánica y retención de agua (Sivila *et al.*, 1994). Esto se reflejó al evaluar el porcentaje de humedad del suelo de este estudio, donde la RP presentó valores mayores con respecto a los obtenidos en el control ($F = 8,105$, $P = 0,001$) y en la RA (Figura 3), posiblemente porque al no estar presente vegetación, la cantidad de agua que se encuentra en el suelo no es absorbida por las plantas y por ende se acumula en mayores proporciones (Díaz *et al.*, 2005). Los valores de humedad registrados durante el estudio (33-52%) fueron bajos en comparación con los valores registrados en el páramo de Guerrero (75%), posiblemente porque la época climática de lluvia del páramo Guerrero es más larga, al ser un páramo interandino (tetramodal), además que no se han presentado incendios forestales en este y por ende sus características se han mantenido intactas a lo largo del tiempo (Tobón *et al.*, 2007).

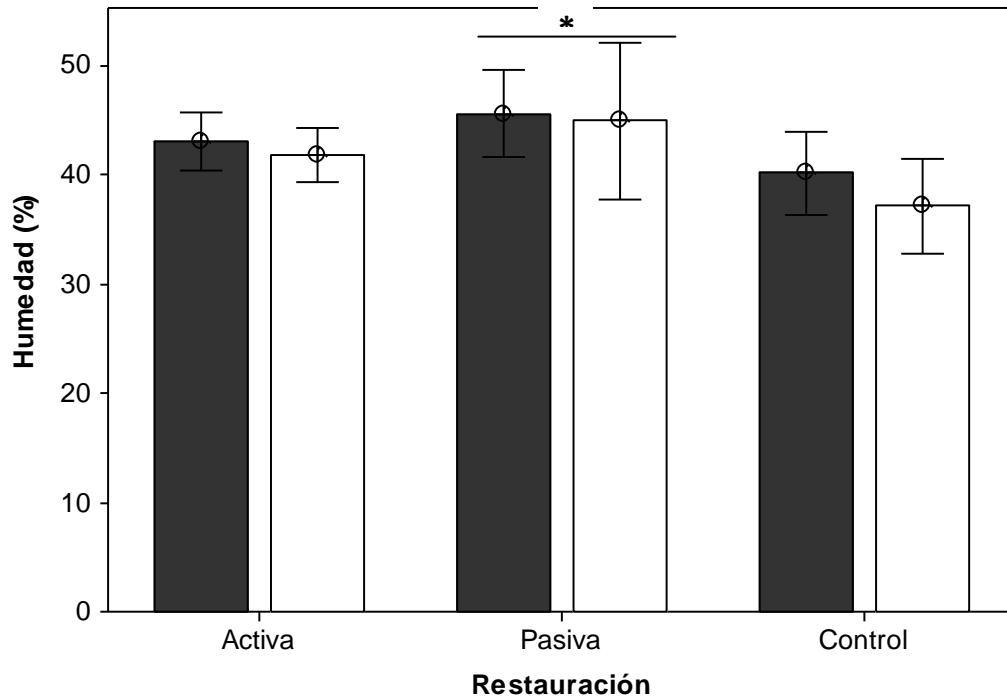


Figura 3. Promedio \pm desviación estándar del porcentaje de humedad en las dos épocas climáticas, bajo los tratamientos de restauración y control. El * indica diferencias significativas ($P < 0,05$).

Para la conductividad se obtuvieron valores entre 0,0129 dS/m y 0,1414 dS/m, determinando que son suelos no salinos (0 dS/m – 0,98 dS/m) de acuerdo a lo reportado por la USDA (1999). Al comparar estos resultados con el estudio realizado en el páramo Negro en Venezuela (0,06 – 0,17 dS/m) los datos se encuentran en proporciones similares. La conductividad eléctrica fue menor en la RA, luego en la RP y finalmente el control presentó los mayores valores ($F = 13,815$, $P = 0,000$), lo que posiblemente se debió a la introducción de vegetación en un suelo afectado, ya que las plantas consumen y retienen con mayor rapidez los nutrientes y el agua que se encuentran en el suelo, disminuyendo tanto la humedad como la conductividad en este (Mataix-Solera, 2000). No obstante esta diferencia no es biológicamente importante, ya que los promedios de los valores encontrados son 0,024 (RA), 0,040 (RP) y 0,060 (control), encontrándose en el mismo rango anteriormente descrito para suelos no salinos.

Por otro lado el suelo del área de estudio presentó valores mayores de conductividad eléctrica en la época seca con respecto a los registrados en la época de lluvia ($F = 7,33$, $P = 0,011$). Debido a que al presentarse un aumento en la temperatura la humedad relativa del suelo tiende a disminuir, y los nutrientes (iones y cationes) que se encuentran en la solución del suelo se concentran, generando un aumento en la salinidad de este (Mataix-Solera, 2000; USDA, 1999), se puede sugerir que en este caso hubo una mayor concentración de iones cuando la cantidad de agua en el suelo disminuyó. A pesar de esto el hecho de que este suelo se encuentre clasificado como no salino, permite a las bacterias y demás microorganismos desarrollarse sin presión alguna en cuanto a la concentración elevada de algunos nutrientes se refiere (USDA, 1999).

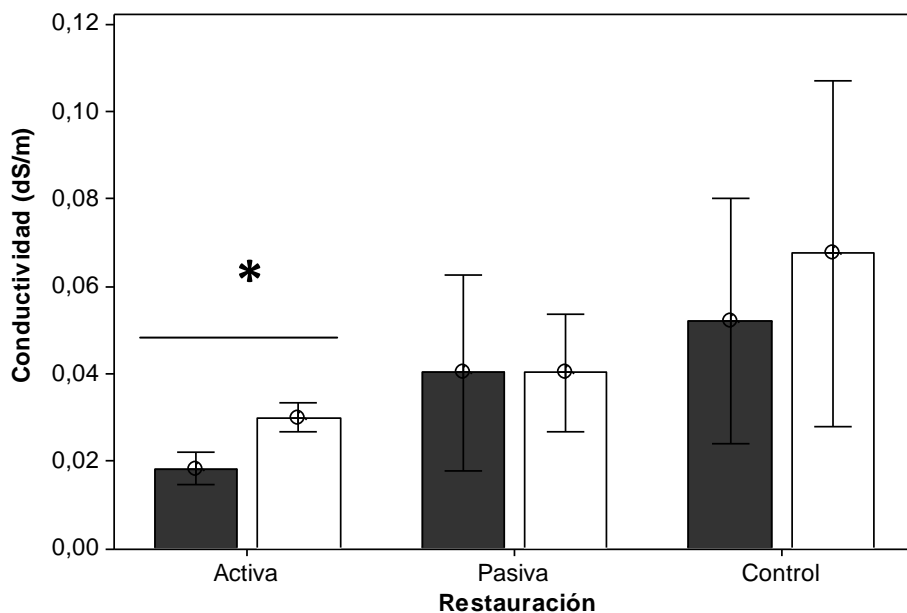


Figura 4. Promedio \pm desviación estándar de la conductividad (dS/m) en las dos épocas climáticas, bajo los tratamientos de restauración y control. El * indica diferencias significativas ($P < 0,05$).

Por su parte la textura que presentó el suelo en la zona del estudio fue franco arenosa, ya que tiene origen volcánico (Malagón-Castro, 2002) y coincide con la textura reportada (franco arenosa y franca) para los páramos Cruz Verde, Guasca, El Granizo, Gavidia y Apure, ubicados en Colombia y Venezuela, permitiendo inferir que esta es la textura característica de los suelos de páramo (Montilla *et al.*, 2002; Benavides, Hermida 2008; Cepeda *et al.*, 2005). Los resultados obtenidos muestran que en la RA se presentó mayor porcentaje de arena ($F = 4,67$, $P = 0,017$) y limo ($F = 5,23$, $P = 0,011$) con respecto a la RP y al control; sin embargo los valores son muy similares y las diferencias se podrían atribuir a condiciones particulares de sitio (Mataix-Solera *et al.*, 2000). Además al comparar los porcentajes de arena: 75,5 (RA), 72,5 (RP), 72 (control), limo: 17,666 (RA), 20,5 (RP), 21,5 (control) y arcilla: 6,833 (RA), 7 (RP), 6,5 (control) con el estudio realizado en el Páramo Negro, municipio Iribarren estado Lara (Venezuela) en donde se encontraron valores que oscilaban entre 28,4-82,4% para arena, 7,2-29,2% para limo y 10,4-48,4% para arcilla (Betancourt *et al.*, 2005), se encontró que los valores de arena y limo del presente estudio estaban dentro del rango (Figura 5).

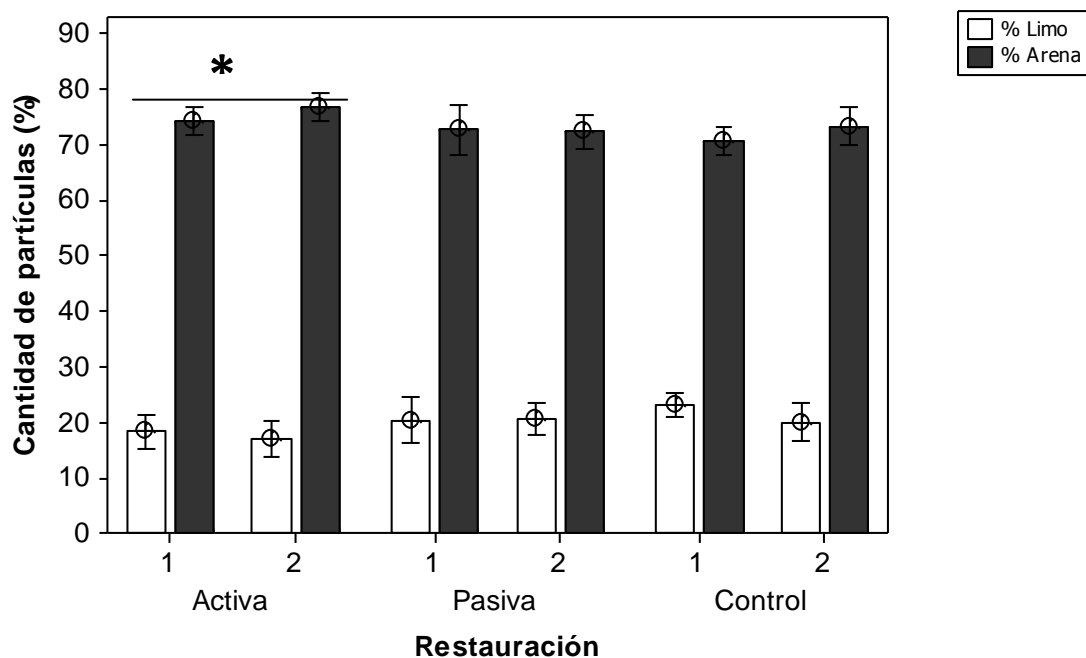


Figura 5. Promedio \pm desviación estándar del porcentaje de limo y arena en las dos épocas climáticas, bajo los tratamientos de restauración y control. 1 y 2 corresponden a las épocas climáticas. El * indica diferencias significativas ($P < 0,05$).

Al ocurrir un incendio se espera que el pH del suelo se incremente debido al aporte de cationes como Ca, Mg, K, Si, P entre otros microelementos contenidos en las cenizas, la destrucción de ácidos orgánicos presentes, la pérdida de grupos OH y la formación de óxidos (Giovannini *et al.*, 1990; Mataix- Solera *et al.*, 2000). A pesar de esto se debe tener en cuenta que la variación del pH del suelo se relaciona directamente con la intensidad del incendio y con la cantidad de materia orgánica presente en este. Por tal motivo en incendios donde la combustión de materia orgánica es baja, los cambios de pH llegan a ser insignificantes, como se encontró en el estudio realizado por Aguirre *et al.* (2000), quienes evaluaron suelos de páramo encontrados en la Sierra Central del Perú que fueron intervenidos por medio de quemas controladas, registrándose valores muy cercanos, de 5,5 iniciales y 5,9 después de las quemas. Esto fue lo mismo que se encontró en el presente estudio, ya que no se encontraron diferencias significativas para el pH entre los tratamientos ($F = 1,96$, $P = 0,159$). Esto es señal del efecto amortiguador de la cantidad de agua y materia orgánica presente, pues no se presenta una deshidratación de los coloides o simplemente porque la degradación de las cenizas no pudo modificar significativamente este parámetro químico (Carúa *et al.*, 2008). Asimismo se debe observar que el incremento en el pH favorece el crecimiento de las bacterias evaluadas y la actividad de estas, ya que crecen a pH cercanos a la neutralidad (Robertson, Alexander, 1992; Mataix- Solera *et al.*, 2000). Aunque valores de pH entre 6,5 y 7,5 se han registrado como los óptimos para el crecimiento de las bacterias (Bobadilla y Rincón, 2008), se ha reportado que a valores menores (5,0 y 5,5) su potencial para la producción de enzimas y ácidos incrementa, permitiendo la solubilización de fosfatos que se encuentran fijados principalmente en arcillas (Hamman *et al.*, 2008). Los valores registrados durante el estudio se encuentran dentro de los rangos establecidos (4,59 – 6,12) permitiendo el crecimiento y el desarrollo de la actividad de las BSK y las BSP. Además al evaluar las épocas climáticas (lluvia y seca) se observa que se presentan valores menores (4,59 - 5,87) en época seca que pueden

deberse a efectos de evaporación y valores mayores (4,73 - 6,12) en época húmeda ($F= 10,56$, $P= 0,003$) probablemente por el efecto de dilución (Sarmiento *et al.*, 2005).

Por último para evaluar la influencia de las propiedades fisicoquímicas sobre la densidad de las BSP y BSK se ajustaron dos modelos matemáticos que permitieron explicar el comportamiento de los dos grupos funcionales a lo largo de la restauración en función de estas propiedades.

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \dots + \xi$$

Y_1 = Variable dependiente (densidad de bacterias solubilizadoras de fósforo).

β_0 = Intercepto

β_1 = parámetros estimados para la variable independiente X_1

X_1 = Variable independiente (parámetro fisicoquímico).

ξ = Error residual

El comportamiento de las BSP estuvo influenciado por los macroagregados de 1,18 mm, la conductividad y densidad de BSK (Ecuación 1) y el coeficiente de determinación de la regresión lineal, sugirió que el ajuste de los datos observados a un comportamiento lineal es alto ($R^2= 0,673$, $P<0,001$, $F= 15,954$, $n= 36$), lo que podría estar indicando que la influencia de la distribución de los agregados de tamaño 1,18 mm sobre la densidad puede estar asociada a que la concentración de la materia orgánica suele distribuirse en los agregados de manera que en los microagregados encuentran la materia orgánica humificada y en los macroagregados se encuentran los carbohidratos (Mataix- Solera *et al.*, 2002). Esto permite que las BSP tengan un fácil acceso a estos agregados aumentando así su densidad. Adicionalmente este grupo de bacterias presenta una mayor afinidad hacia los macroagregados, ya que en estos suelen fijarse grandes cantidades de P y permiten que haya mayor cantidad de O_2 disponible en el suelo (Borda *et al.*, 2009). La presencia de BSK presenta una influencia sobre la densidad de las BSP, posiblemente porque al solubilizar los compuestos que contengan K, pueden liberar P que se encontraba en estos compuestos, facilitándole la disponibilidad del nutriente y permitiendo que se desarrollen más rápidamente (Han *et al.*, 2006). Por último en el caso de la conductividad la influencia sobre la densidad se basa en que al mantenerse una concentración estable de iones en la solución del suelo ($<1\text{dS/m}$), la presión osmótica de las bacterias no se ve afectada, lo que facilita el intercambio iónico, la toma de nutrientes y por ende el aumento de su densidad (USDA, 1999).

$$Y = 705,275X_0 + 0,652X_1 + 0,25X_2 + 0,26X_3 \text{ (Ecuación 1).}$$

X_0 corresponde al intercepto, X_1 corresponde a la cantidad de macroagregados de 1,18mm, X_2 a densidad de las BSK y X_3 a conductividad.

Por otra parte el comportamiento de las BSK se vió influenciado por el porcentaje de macroagregados de 1,18 mm y la densidad de las BSP (Ecuación 2), donde el coeficiente de determinación de la regresión lineal, sugirió que el ajuste de los datos observados a un comportamiento lineal es bajo ($R^2= 0,303$, $P=0,008$, $F= 4,637$, $n= 36$), lo que podría estar sugiriendo que la densidad de estas bacterias podría estar explicada por otras variables no evaluadas durante el estudio como la concentración de microelementos (Mg, Ca y Na).

$$Y = 4,753X_0 - 0,62X_1 + 0,467X_2 \text{ (Ecuación 2).}$$

X_0 corresponde al intercepto, X_1 corresponde a la densidad de las BSP y X_2 a la cantidad de macroagregados de 1, 18mm.

Los efectos de la distribución de agregados de 1,18 mm y la presencia de las BSP sobre la densidad de las BSK, es equivalente a lo analizado en el modelo de las BSP. La distribución de los agregados y de la materia orgánica en estos hace las bacterias tendrán fácil acceso a los nutrientes y por lo tanto un aumento en la densidad, teniendo una mayor afinidad por los macroagregados ya que es en estos donde se fija el K y se encuentran en mayores proporciones el O_2 (Mataix- Solera *et al.*, 2002; Borda *et al.*, 2009) y en el caso de la presencia de BSP, por acción de ácidos y enzimas (fosfatasa) se puede liberar K que se encuentre en los compuestos que solubilicen y dejarlos de manera disponible para que lo empleen estas bacterias (Han *et al.*, 2006).

CONCLUSIONES

Se encontró que los tratamientos de RP y RA ejercen un efecto positivo sobre la densidad de las BSP ya que se presentó un aumento en el orden con respecto al control. En el caso de las BSK, estas permiten distinguir los dos tipos de restauración, sugiriendo que la RA permite una recuperación más rápida del suelo al favorecer un aumento en su densidad.

Se estableció que la distribución de agregados, la conductividad y la textura del suelo cambiaron por efecto de la RA, mientras que en la RP sólo el porcentaje de humedad varió.

Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que permiten explicar el comportamiento de las BSP y BSK corresponden a los macroagregados de 1,18 mm, la conductividad, la densidad de BSK y la densidad de las BSP.

RECOMENDACIONES

Determinar de manera más efectiva el efecto de las restauraciones sobre las BSP y BSK, realizar pruebas colorimétricas que permitan medir su actividad enzimática (pirofosfatasa o p- nitrofenil fosfato), también medir otros parámetros como la concentración de microelementos Mg, Ca y Na, para observar si estos presentan influencias sobre las BSK.

Continuar con los monitoreos de los tratamientos de restauración activa y pasiva para determinar con mayor exactitud cuál de ellos es el que presenta mayores beneficios para la recuperación del suelo.

AGRADECIMIENTOS

A la Pontificia Universidad Javeriana por el préstamo de laboratorios y equipos, a la Universidad Tecnológica de Pereira, en especial a Alexander Rodríguez por su ayuda en la recolección de muestras, a nuestra directora Amanda Varela, por ser nuestra guía a lo largo de este camino, al laboratorio de Ecología de Suelos y Hongos tropicales, por el apoyo prestado durante el proyecto y a nuestros padres y hermanos por el apoyo y comprensión en todo momento.

BIBLIOGRAFÍA

Acuña, O; *et al.* La importancia de los microorganismos en la calidad y salud de los suelos. ACORBAT. Santa Catarina, Brasil. 2006, 222 – 233p.

Andrades, M. Prácticas de Edafología y Climatología. Universidad de la Rioja. Servicio de Publicaciones. Logroño, España. 1996; 19, 22, 32, 48, 80p.

Alexander, M. Transformaciones microbianas del fósforo. Introducción a la microbiología del suelo. AGT editor, México. . 1980, 491 p.

Atrih A, Foster SJ. Bacterial endospores the ultimate survivors. *International Dairy Journal* 2002; **12**, 217–223.

Avellaneda A. Alteración del páramo de Chontales en Boyacá por ganadería, aplicación de plaguicidas en papa y cultivos de pino (*Pinus pátula*). *Senderos ambientales* 2006; **1**(1): 71-80.

Barrera, J; *et al.* Metodología para abordar la restauración ecológica, en el marco de la sostenibilidad, de la microcuenca Santa Helena, Municipio de Suesca, Departamento de Cundinamarca-Colombia. 2005. Disponible en: www.dama.gov.co

Barrera-Cataño, J; Valdés-López, C. Herramientas para abordar la restauración ecológica de áreas disturbadas en Colombia. *Universitas Scientiarum* 2007; **12**(2): 11-24.

Bernal E, Celis S, Galíndez X, Moratto C, Sánchez J, García D. Microflora cultivable y endomicorrizas obtenidas en hojarasca de bosque (Páramo Guerrero-Finca Puente de Tierra) Zipaquirá, Colombia. *Acta biol.Colomb.* 2006; **11** (2): 125-130.

Benavides H, Hermide A. Aislamiento e identificación de flora bacteriana nativa del suelo de los páramos Cruz Verde y Guasca (Cundinamarca). **Trabajo de Grado**. Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2008, 118 p.

Betancourt P, González J, Figueroa B, González F. Materia orgánica y caracterización de suelos en proceso de recuperación con coberturas vegetativas en zonas templadas de México. *TERRA* 1999; **17**(2): 139 -148.

Betancourt P, Montilla I, Hernandez C, Gallardo E. Fertilización nitrogenada en el cultivo de piña (*Ananas comosus* L. Merr) en el sector Páramo Negro, municipio Iribarren estado Lara. *Rev. Fac. Agron.* 2005; **22** (4): 382-393.

Bobadilla, C. Aislamiento y producción de bacterias fosfato solubilizadoras a partir de compost obtenido de residuos de plaza. **Trabajo de grado**. Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2008,1-97p.

Bonilla M.A. *Estrategias adaptativas de plantas del páramo y del bosque altoandino en la cordillera Oriental de Colombia*. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2005,353 p.

Borda N, Largo Y. Comparación de la densidad de bacterias denitrificantes entre bosque inundado y morichal en la reserva natural Bojonawi. **Trabajo de grado**. Facultad de ciencias. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2009, 96 p.

Carrillo, L. Microbiología agrícola. Guía biológica de la Universidad de Salta, Patagonia-Argentina, 2003, 28 p.

Carúa J, Proano M, Suarez D, Podwojewski P. Determinación de retención de agua en los suelos de los páramos: estudio de caso en la subcuenca del río San Pedro, canton Mejia, Pichincha, Ecuador. *Ecociencia* ; Abya-Yala 2008; **26**, 27-45.

Cepeda M, Gamboa M, Valencia H, Lozano A. Hongos solubilizadores de fosfatos minerales aislados de la rizosfera de *Espeletia grandiflora* del páramo el Granizo. Bonilla M.A. (ed). *Estrategias adaptativas de plantas del páramo y del bosque altoandino en la cordillera Oriental de*

Colombia. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2005, 353 p.

Chagas I. Efectos de la rugosidad superficial, el tamaño de agregados y la estabilidad estructural sobre la erosión entre surcos en un argiudol. *Ciencia del suelo* 1995; **13**, 85-90.

Díaz, S. Cabido, M. Plant functional types and ecosystem function in response to global change: a multiscale approach. *J. Veg. Sci* 1997; **8**, 463-474.

Fassbender H, Bonermisza E. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Editorial IICA. Costa Rica, 1987, 426p.

Gálvez J. La restauración ecológica: conceptos y aplicaciones. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales Y Ambiente, Universidad Rafael Landívar. Guatemala. 2002; **8**, 5-23.

Gelvez I. Efecto del uso del suelo sobre la descomposición de hojarasca y grupos funcionales microbianos (Cuenca del Río La Vieja, Quindío). **Trabajo de Grado**. Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2008, 79 p.

Giovaninni G, Lucchesi S, Giachetti M. Effects of heating on some chemical parameters related to soil fertility and plant grow. *Soil Science* 1990; **149** (6), 323-398.

Han H, Supanjani K, Lee D. Effect of co-inoculation with phosphate and potassium solubilizing bacteria on mineral uptake and growth of pepper and cucumber. *Plant Soil and Environment* 2006; **52** (3): 130-136.

Hamman S, Burke I, Knapp E. Soil nutrients and microbial activity after early and late season prescribed burns in a Sierra Nevada mixed conifer forest. *Forest Ecology and Management* 2008; **256**, 367-374.

Hobbs, R.J.; Richardson, D.M.; Davis, G.W. Mediterranean-Type Ecosystems. Opportunities and constraints for studying the function of biodiversity. En: Davis, G.W.; Richardson, D.M. (eds.). *Mediterranean-Type Ecosystems. The function of biodiversity. Ecological Studies*, vol. 109. Berlín. 1995; 121-183.

Kennedy, A. C. Bacterial diversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment, Amsterdam* 1999; **74**(1): 65-76.

Limas LF. Estudio de barbechos en el páramo La Cumbre, en diferentes estados sucesionales y su relación con la recuperación del suelo. **Trabajo de Grado**. Facultad de Ingenierías. Corporación Universitaria de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Bogotá, 2002, 135p.

Llambí L, Sarmiento L. Biomasa microbiana y otros parámetros edáficos en una sucesión secundaria de los páramos venezolanos. *ECOTROPICOS* 1998; **11**(1): 1-14.

Malagon – Castro D. Los suelos de las regiones paramunas de Colombia y Venezuela. Congreso Mundial de Páramos – memorias. 2002, 647 p.

Martínez J, Heras J, Herranz J. Impacto ecológico de los incendios forestales. *Revista de estudios albacetenses* 1991; **29**, 105-117.

Mataix - Solera J. Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales: contribución a su conservación y regeneración. **Tesis Doctoral**. Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante, España, 2000, 321 p.

Montes, C. Ecosistemas. Revista de Divulgación Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente. Departamento Interuniversitario de Ecología, Universidad Autónoma de Madrid, 2002; **11**(1).

Montilla M, Herrera-Peraza R, Monasterio M. Influencia de los períodos de descanso sobre la distribución vertical de raíces, micorrizas arbusculares y pelos radicales en páramos andinos venezolanos. *Ecotrópicos* 2002; **15** (1):85-98.

Mora-Osejo LE. Estudios ecológicos del páramo y del bosque altoandino Cordillera Oriental de Colombia. Segunda edición. Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales. Colección Jorge Alvarez Lleras No. 6. Bogotá, D.C., Colombia. 1995, 348 p.

Moratto C, Martínez L, Valencia H, Sánchez J. Efecto del uso del suelo sobre hongos solubilizadores de fosfato y bacterias diazotróficas en el páramo de Guerrero (Cundinamarca). *Agronomía Colombiana* 2005; **23**(2): 299-309.

Pikovskaya, R; *et al.* Mobilization of phosphorus in soil in connection with the vital activity of some microbial species. *Mikrobiologiya* 1948; **17**, 362-370.

Pikul J.; Howell T.; Marcel Dekker. Soil water gravimetric measurement of soil water. In Stewart, Encyclopedia of water Science. New York, U.S.A.. p. 879-881.

Premauer, J; Vargas, O. Patrones de diversidad en vegetación pastoreada y quemada en un páramo húmedo (Parque Natural Chingaza, Colombia), Sociedad Venezolana de Ecología. *Ecotrópicos* 2004; **17** (1-2): 52-66.

Robertson B, Alexander M. Influence of Calcium, Iron, and pH on Phosphate Availability for Microbial Mineralization of Organic Chemicals. *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY* 1992;**58** (1):38-41.

Rodriguez, H; Fraga, R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances* 1999; **17**, 319-339.

Sáenz D. Efecto de un incendio forestal sobre grupos funcionales bacterianos edáficos en una plantación de *Eucalyptus cinerea* (Suesca-Cundinamarca). **Trabajo de grado**. Facultad de ciencias. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C. 2006, 75p.

Santos D. Comparación de la Abundancia de dos grupos funcionales bacterianos edáficos entre sistemas de cultivos cafeteros de la cuenca "La Vieja" (Departamento del Quindío). **Trabajo de grado**. Facultad de ciencias. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C. 2007, 80 p.

Sivila R; Hervé D. El estado microbiológico del suelo, indicador de una restauración de la fertilidad. *Dinámicas del descanso de la tierra en los Andes* 1994,185-19.

Stevenson F; Cole M. *Cycles of soil*. WJ. Segunda edición. London, 1999, 428 p.

Tobón C, Gil E. Capacidad de interceptación de la niebla por la vegetación de los páramos andinos. *AVANCES EN RECURSOS HIDRÁULICOS* 2007; **15**.

Torres, M; Lizarazo, L. Evaluación de grupos funcionales (Ciclo del C, N, P) y actividad de la fosfatasa ácida en dos suelos agrícolas del departamento de Boyacá (Colombia). *Agronomía Colombiana* 2006; **24**, 317-325.

Torsvik V.; Øvreås, L. Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems. *Current Opinion in Microbiology* 2002; **5** (3): 240–245.

USDA. Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Colorado, Estados Unidos. 1999, 82 p.

Vargas O. Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. Primera edición. Universidad Nacional de Colombia. 2007, 17-29 p.

Vargas, O. Un modelo de sucesión regeneración de los páramos después de quemadas. *Caldasia* 1997; **19**(1-2): 331–345.

Vazquez P, Holguín G, Puente M, López A, Bashan Y. Phosphate-solubilizing microorganisms associated with the rhizosphere of mangroves in a semiarid coastal lagoon. *Biol Fertil Soils* 2000; **30**, 460-468.

Vega J. Bases ecológicas para la restauración preventiva de zonas quemadas. Sevilla Wildfire 2007.

Walker, B.H. Biodiversity and ecological redundancy. *Conservation Biology* 1992; **6**, 18-23.

Walker, B.H. Conserving biological diversity through ecosystem resilience. *Conservation Biology* 1995; **9**: 747-752.