

**Estimación de la actividad microbiana asociada al carbono en suelos del complejo de
humedales de la quebrada Dalí**

Luisa Marina Montoya Posada

Universidad Nacional Abierta y a Distancia “UNAD”

Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente

Programa de Ingeniería Agroforestal

Dosquebradas

2019

Estimación de la actividad microbiana asociada al carbono en suelos del complejo de humedales de la quebrada Dalí

Luisa Marina Montoya Posada

Octubre 2019

Director:

Ph.D. Sandra Patricia Montenegro Gómez

TRABAJO DE GRADO

Presentado como requisito parcial para optar el título de

INGENIERA AGROFORESTAL

Universidad Nacional Abierta y a Distancia “UNAD”

Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente

Programa de Ingeniería Agroforestal

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Pereira – Risaralda, octubre 15 de 2019

Dedicatoria

A Dios, por ser mi fuente de inspiración, mi creador, mi salvador, mi amor y mi todo. A ese ser maravilloso e invisible, infinitas gracias por mi vida y por todos los procesos que me han hecho crecer para ser hoy mejor que ayer.

A mi madre por ser la guerrera que me enseñó a nunca darme por vencida; a mis hermanas por ser ejemplo de tenacidad y entrega; a mi padre por enseñarme la paciencia y la tranquilidad; a mis hijos porque con cada uno he tenido un hermoso aprendizaje de vida, Nicolás me enseñó a enfrentar la vida con coraje, a seguir siempre adelante pese a las dificultades, de Isaac gran mensajero de luz, he aprendido a ver la vida con más calma y más belleza y a mi compañero de viaje, por ser quien ha forjado en mí el amor, pero también el carácter.

Agradecimientos

Quien siempre encabezará la lista será Dios, a Él infinitas gracias; eres esa fuerza estallada de luz invisible pero envolvente que siempre me ha acompañado a lo largo de mi viaje en este plano existencial.

A mi familia por acompañarme, guiarme, aconsejarme, motivarme, por ser ese pilar que los seres humanos necesitamos para sentir que en este viaje no estamos solos mil gracias.

A mi directora de trabajo de grado, Sandra Patricia Montenegro, muchas gracias por compartir sus conocimientos conmigo, por su paciencia, su disposición, por su buena energía, por confiar en mí y ser una guía en mi proceso académico para poder culminar esta etapa.

A Juan Carlos Padilla por su entero compromiso para con los estudiantes, porque fue la persona que siempre me dio una mano en todo mi recorrido en la universidad. Gran ser humano y excelente profesional. Mil gracias.

A Liliana Bueno, amiga incondicional, ángel de la vida, infinitas gracias, por la compañía, por aportarme conocimiento, por motivarme a investigar, por el ejemplo, porque siempre ha sido mi guía en estos procesos académicos y finalmente por estar siempre ahí y siempre es siempre.

A Marcela Uribe Lastra y a Jeymy Milena Walteros integrantes del Grupo de Ecología, Ingeniería y Sociedad de la Universidad Tecnológica de Pereira; por abrirme un espacio en el Grupo de Investigación, por su apoyo, por ese respeto y esa sutileza para compartir conocimiento y transmitirlo.

Al Grupo de investigación Ecología, Ingeniería y Sociedad de la Universidad Tecnológica de Pereira, por permitirme hacer parte de ese gran proyecto en el Humedal Lisbran.

Al laboratorio de Análisis de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira, por hacer posible esta investigación, por facilitarme el espacio, los materiales y los equipos para el desarrollo de este trabajo.

Tabla de Contenidos

Lista de tablas	8
Lista de figuras.....	9
Anexos	11
Resumen.....	12
Abstract.....	13
INTRODUCCIÓN	14
1. JUSTIFICACIÓN	18
2. Objetivos.....	21
2.1. Objetivo general.....	21
2.2. Objetivos específicos	21
3. Pregunta de investigación	22
4. Marco teórico	23
4.1. Humedales	23
4.2. Tipo de humedales	24
4.3. Función e importancia de los humedales.....	26
4.4. Servicio ecosistémicos en humedales	27
4.5. Función de los humedales en ciclo del carbono	28
4.6. El ciclo del carbono	29
4.7. Calidad del suelo en humedales.....	32
4.8. Materia orgánica del suelo.....	33
4.9. Actividad microbiana del suelo relacionada con el carbono	34
5. Materiales y métodos	37
5.1. Localización y descripción del área de estudio	37
5.2. Muestreo	38
5.3. Determinaciones	41
5.3.1. Respiración método basal	41
5.3.2. Biomasa microbiana por respiración inducida por el sustrato (SIR)	43
5.3.2.1. Humedad	43
5.3.2.2. Capacidad de Campo.....	44
5.3.2.3. Cantidad de agua a adicionar	46
5.3.2.4. Biomasa microbiana por respiración inducida por el sustrato (SIR)	46
5.3.3. Determinación de pH	48
5.3.4. Materia Orgánica	48

5.3.5.	Análisis Microbiológico.....	49
5.3.5.1.	Recuento en placa de Mohos y levaduras	50
5.3.5.2.	Microorganismos heterotróficos	51
5.3.5.3.	Microorganismos celulolíticos	52
5.3.6.	Análisis estadístico.....	52
6.	Resultados y Discusión	53
6.1.	Actividad microbiana.....	53
6.2.	Biomasa microbiana asociada al carbono.....	58
6.2.1.	Humedad	58
6.2.2.	Capacidad de Campo	59
6.2.3.	Cantidad de Agua Adicionar.....	60
6.2.4.	Biomasa Microbiana por Respiración Inducida por Sustrato	60
6.3.	Variables fisicoquímicas.....	63
6.3.1.	Valor de pH.....	63
6.3.2.	Materia Orgánica	65
6.4.	Estimación cuantitativa de hongos, microorganismos heterotróficos y microorganismos celulolíticos	67
6.4.1.	Hongos (Mohos y Levaduras).....	67
6.4.2.	Microorganismos Heterotróficos	68
6.4.3.	Microorganismos Celulolíticos	70
6.5.	Análisis de Correlaciones	72
6.	Conclusiones	77
7.	Recomendaciones	79
8.	Bibliografía	80
9.	Anexos	89

Lista de tablas

<i>Tabla 1.</i> Clasificación de los humedales naturales según la Convención Ramsar.	25
<i>Tabla 2.</i> Clasificación de las especies vegetales muestreadas.....	40

Lista de figuras

Figura 1. Detalle experimental de la actividad microbiana por medio de la respiración inducida..	15
Figura 2. Entradas y Salidas del Carbono Edáfico	31
Figura 3. Complejo de Humedales y Quebrada Dalí.....	37
Figura 4. Mapa del Área de Estudio, Complejo de Humedales y Quebrada Dalí	38
Figura 5. Diseño Experimental de Estudio de la Quebrada Dalí	39
Figura 6. Cobertura Vegetal seleccionadas para estudio: a) <i>Hyparrhenia rufa</i> (M1); b) <i>Eleocharis acicularis</i> (M2) y c) <i>Eleocharis acutangula</i> (M3).	40
Figura 7. Proceso de Toma de Muestras: a) Toma de muestras; b) Composición de muestra; c) Almacenamiento de muestras; d) Rotulación de muestras.	41
Figura 8. Procedimiento de las Muestras para Análisis de Respiración. a) Incubación b) Muestra antes de titular con adición de cloruro de bario c) punto final de la titulación.	43
Figura 9. Determinación de Humedad.....	44
Figura 10. Análisis de Capacidad de Campo.....	45
Figura 11. Capacidad de Campo. a) Secado de las muestras; b) Capacidad de campo	46
Figura 12. Tratamiento de las muestras para análisis de biomasa microbiana. a) Incubación con glucosa; b) Muestra antes de titular con adición de cloruro de bario c) punto final de la titulación	47
Figura 13. Determinación de pH.....	48
Figura 14. Determinación de Materia Orgánica. a) Estándares para la preparación de la curva de calibración; b) Espectro fotómetro usado.	49
Figura 15. Técnica de recuento en placa por dilución, por Laboratorio Microbiología Industrial, 2017.....	50
Figura 16. Procedimiento de Siembra por Recuento en Placa. a) Preparación solución madre; b) y c) Preparación diluciones y d) Cajas sembradas por superficie.	51
Figura 17. Actividad Microbiana–CO ₂ entre muestras bajo diferentes coberturas vegetales (n=3). Valores con la misma letra entre tratamientos no difieren significativamente entre sí. (prueba de Tukey, (P<0.05)).....	54
Figura 18. Porcentaje de humedad entre muestras bajo diferentes coberturas vegetales (n=3). Medias con una letra común no son significativamente diferentes (prueba de Kruskal Wallis, (P<0.05)).	59
Figura 19. Biomasa Microbiana asociada al carbono de las muestras de suelo con (n=3). Valores con la misma letra entre tratamientos no difieren significativamente entre sí. (prueba de Tukey, (P<0.05)).	61
Figura 20. Valor de pH de las muestras de suelo bajo coberturas vegetales diferentes con (n=3). Valores con la misma letra entre tratamientos no difieren significativamente entre sí. (prueba de Tukey, (P<0.05)).	64
Figura 21. Porcentaje de Materia Orgánica en las muestras de suelo bajo coberturas vegetales diferentes con (n=3). Valores con la misma letra entre tratamientos no difieren significativamente entre sí. (prueba de Tukey, (P<0.05)).	65

- Figura 22.** Unidades Formadoras de Colonia de Hongos (Mohos y Levaduras) presentes en las muestras de suelo bajo diferentes coberturas vegetales con n=3. Valores con la misma letra entre tratamientos no difieren significativamente entre sí. (prueba de Tukey, (P>0.05)). 68
- Figura 23.** Unidades Formadoras de Colonia de Microorganismos Heterótrofos presentes en las muestras de suelo bajo diferentes coberturas vegetales con n=3. Valores con la misma letra entre tratamientos no difieren significativamente entre sí. (prueba de Tukey, (P>0.05)). 69
- Figura 24.** Unidades Formadoras de Colonia de Microorganismos Celulolíticos presentes en las muestras de suelo bajo diferentes coberturas vegetales con n=3. Valores con la misma letra entre tratamientos no difieren significativamente entre sí. (prueba de Tukey, (P>0.05)). 70

Anexos

Anexo 1. Medio De Cultivo Para Celulolíticos (Word,1980)	89
Anexo 2. <i>Análisis de Varianza</i>	89
Anexo 3. <i>Prueba de Tukey</i>	89
Anexo 5. Análisis de Correlaciones de Pearson	91

Resumen

Los humedales son ecosistemas vulnerables que juegan un papel fundamental en la dinámica hidrológica, cultural, ecológica y socioeconómica de la región andina colombiana. La participación de los humedales en el ciclo global del carbono es de suma importancia, al actuar como sumideros de dicho elemento. Sin embargo, el impacto generado por las actividades antropogénicas en la dinámica estructural y funcional de estos ecosistemas es una problemática que tiene como resultado la modificación de los flujos en los ciclos biogeoquímicos, a través de la regulación de la población y diversidad microbiana edáfica, contribuyendo con el deterioro de estos ecosistemas. La vegetación en los humedales es un factor que influencia el almacenamiento de C en dichos ecosistemas. Es por ello, que se llevó a cabo este estudio para evaluar la actividad microbiana asociada al carbono en el suelo del complejo de humedales de la quebrada Dalí, en tres sitios a una profundidad de 0 a 25cm, con diferente cobertura vegetal: *Hyparrhenia rufa* (M1), *eleocharis acutangula* (M2) y *eleocharis acicularis* (M3), comparando resultados de respiración basal, biomasa microbiana y materia orgánica; adicionalmente se realizaron análisis de pH, humedad, capacidad de campo y microbiológico de celulolíticos, hongos y bacterias, para establecer relaciones con la actividad microbiana.

Palabras clave: *Biomasa microbiana, humedal, celulolíticos, actividad respiratoria, carbono.*

Abstract

Wetlands are vulnerable ecosystems that play a fundamental role in the hydrological, cultural, ecological and socio-economic dynamics of the Colombian Andean region. The participation of wetlands in the global carbon cycle is of the utmost importance, acting as sinks for that element. However, the impact generated by the anthropogenic activities in the structural and functional dynamics of these ecosystems is a problem that results in the modification of the flows in the biogeochemical cycles, through the regulation of the population and edaphic microbial diversity, contributing with the deterioration of these ecosystems. Vegetation in wetlands is a factor that influences the storage of C in these ecosystems. That is why this study was carried out to evaluate the microbial activity associated with carbon in the soil of the wetland complex of the Dali gorge, in three sites at a depth of 0 to 25cm, with different vegetation cover: *Hyparrhenia rufa* (M1), *eleocharis acutangula* (M2) and *eleocharis acicularis* (M3), comparing results of basal respiration, microbial biomass and organic matter; Additionally, pH, humidity, field and microbiological capacity of cellulolytics, fungi and bacteria were analyzed to establish relations with microbial activity.

Key words: *Microbial biomass, wetland, cellulolytics, respiratory activity, carbon.*

INTRODUCCIÓN

Los humedales son zonas de transición entre ecosistemas terrestres y acuáticos que se caracterizan por sus suelos inundados temporal o permanentemente, cuyos principales componentes son las plantas, el suelo y el agua (Marín, Hernandez, & Morenoola Barceló, 2011). Algunos humedales como las planicies inundables presenta rasgos físicos, químicos y biológicos que reflejan estos procesos, como suelos hídricos y vegetación hidrofítica (Kandus, et al., 2011). Varias de las características físico-químicas y biológicas en los suelos-sedimentos de humedales regulan los ciclos de nutrientes, incluyendo el del carbono (C), participando en el reciclaje del C atmosférico de dos maneras: al capturarlo y transformarlo en materia viva durante la fotosíntesis, y al secuestrarlo en el suelo. Al caer los residuos orgánicos de la planta o cuando ésta llega al suelo por senescencia, el material vegetal se acumula en la superficie y se forma una capa de suelo rica en materia orgánica (turba), sin embargo, no todos los compuestos de C se descomponen con la misma facilidad, más si se habla de humedales dado que, la descomposición de material orgánico dentro de un humedal es un mecanismo que involucra procesos aerobios y anóxicos/anaerobios (Hernández, 2010). Estos procesos anaeróbicos fuerzan a la biota, en particular a las plantas arraigadas, a presentar adaptaciones para tolerar la inundación (Kandus, et al., 2015).

Los procesos biológicos que ocurren en el suelo ejercen un gran control sobre el ciclo del carbono, y son de gran relevancia en estudios biogeoquímicos globales. Dos de los procesos más importantes que afectan a este ciclo son la fotosíntesis de la vegetación y la respiración, en particular la respiración del suelo (Cueva, Yépez, Garatuza, Watts, & Rodriguez, 2012), siendo este uno de los procesos más importantes del ecosistema ya que está relacionado con factores como son la fertilización del suelo, productividad del ecosistema y los ciclos del carbono. Adicionalmente, refleja la actividad biológica del mismo y pone en manifiesto el metabolismo de

los organismos vivos existentes en el suelo (Ochoa & Burneo, 2015), es por ello, que a través de la cuantificación de la respiración del suelo se puede conocer la actividad microbiana. En la figura 1, se resume el procedimiento desarrollado experimentalmente para estimar cuantitativamente la actividad microbiana por medio de la respiración del suelo en el complejo de humedales de la quebrada Dalí.

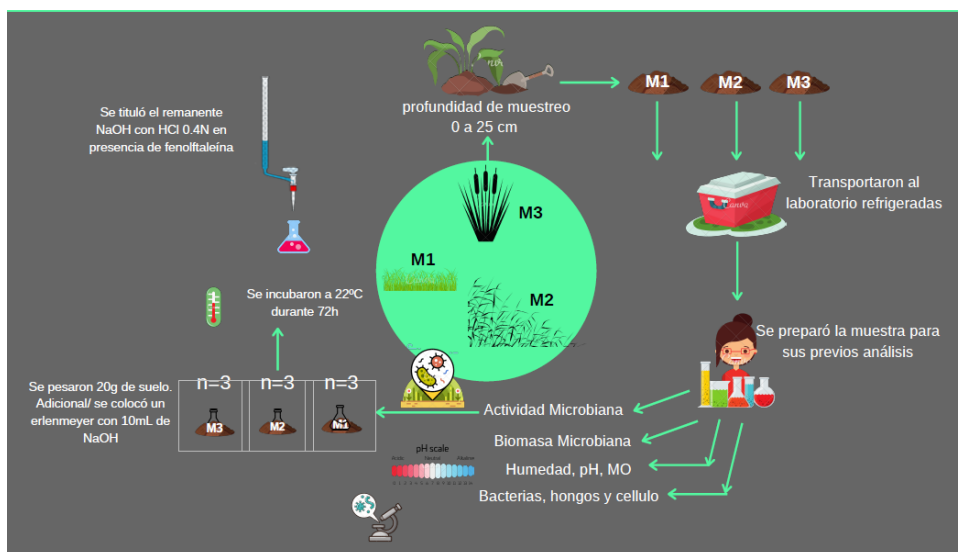


Figura 1. Detalle experimental de la actividad microbiana por medio de la respiración inducida. Elaboración propia.

Existen varios métodos que permiten determinar la respiración del suelo, entre ellos, se encuentra el método de la respiración inducida por sustrato (RIS), el cual, utiliza la respuesta respiratoria inicial de microorganismos del suelo a un sustrato para la obtención de una estimación de la cantidad de carbono retenida; este método se basa en el principio de que los microorganismos reaccionan a la adición de glucosa con una respuesta inmediata de la respiración que es proporcional a la biomasa (Ochoa & Burneo, 2015). Es en la rizosfera donde ocurre la interacción entre las raíces de la planta y los microorganismos del suelo, por ello se dice que existe una intensa

actividad biológica localizada en la parte del suelo inmediata a las raíces (Perez & Chacón, 2008).

Por lo tanto, en el presente estudio el muestreo se llevó a cabo a una profundidad de 0 a 25 cm.

Los humedales en Colombia son ecosistemas altamente amenazados, lo cual genera efectos negativos para la calidad de la población a largo plazo. Lo anterior, como consecuencia de algunas actividades antrópicas insostenibles que a su vez generan la pérdida y degradación de estos ecosistemas implicando un alto costo tanto ecológico, social y económico para el país (Hernández, Victorino, Castro, & Eraso, 2014). La falta de estudios de estos ecosistemas generan implicaciones en la comprensión del ciclo de carbono y procesos relacionados, como el cambio climático y los mecanismos de intercambio de carbono entre la atmósfera y los ecosistemas acuáticos y terrestres para los humedales donde la mayoría de carbono se acumula en forma de materia orgánica que entra en la vía detrítica (Álvares, 2005). En este sentido, se pretende estimar cuantitativamente la respiración de los suelos del humedal de la quebrada Dalí con el objetivo de conocer la actividad microbiana y la biomasa microbiana asociada al carbono y contribuir con el conocimiento de los humedales permanentes tipo pantano arbustivos en cuanto a las funciones ecológicas asociadas a la regulación del ciclaje de nutrientes de los humedales. Los servicios ecosistémicos tienen asociada una escala espacial y una temporal en las que tiene lugar su generación y captura. Por ejemplo, cobertura vegetal, textura del suelo y su pendiente son determinantes en las funciones que prestan.

La cobertura seleccionada para el presente estudio fue la más representativa de cada lote. El pasto jaragua (*Hyparrhenia rufa*) es una hierba alta y perenne, abundantemente naturalizada en las regiones tropicales y subtropicales del mundo en donde se ha introducido intencionalmente para mejorar la producción ganadera (Borja, Chanona, & López, 2017), esta especie está presente dado que, en el pasado, este territorio recibió una fuerte presión por ganadería y plantaciones

forestales y un evidente proceso de transformación del paisaje, debido a la sobreexplotación de los recursos naturales (Valencia, Rodríguez, Arias, & Castaño, 2017).

El género *Eleocharis* tiene aproximadamente 250 especies, generalmente acuáticas y anfibias, distribuidas desde los trópicos a las regiones polares del mundo y con una alta concentración de especies en América (Gil & Bove, 2007). Las especies de *Eleocharis* son emergentes y raramente sumergidas, y se encuentran en pantanos, cascadas, lagunas, lagos, riberas, pantanos, zonas de descanso y suelos abiertos húmedos (Gil & Bove, 2007).

1. JUSTIFICACIÓN

Aun cuando los humedales ocupan sólo entre 4-6% de la superficie terrestre, ellos poseen un papel importante en el ciclo de carbono (Hernández, 2010) y están estrechamente relacionados con el bienestar humano, debido a su trascendente aporte en más del 40% de los servicios ecosistémicos del planeta por año (Valencia & Figueroa, 2015); éstos incluyen, el soporte físico para las plantas, la retención y oferta de nutrientes, el procesamiento de desechos y materia orgánica muerta, el mantenimiento de la fertilidad del suelo, la regulación de los ciclos biogeoquímicos, regulación climática y hábitat para un sinnúmero de organismos que realizan algunas de estas funciones (Balvanera et al., 2009).

Por otro lado, los flujos de carbono en humedales comprenden la caída de hojarasca en humedales arbóreos, la exportación de carbono disuelto en agua y la emisión de gases como bióxido de carbono y metano (Hernández & Moreno, 2018). Así pues, la tasa de producción de CO₂ es científicamente importante porque da una indicación de la tasa de descomposición de la materia orgánica y por tanto de la cantidad que se pierde de carbono del suelo (Rochette & Hutchinson, 2005). Este proceso de descomposición del carbono orgánico en los humedales es complejo dado que la oxidación de la materia orgánica es lenta en condiciones de anaerobiosis y envuelve procesos aeróbicos y anaeróbicos, que finalmente terminan en acumulación de la materia orgánica en los sedimentos de los humedales, generando múltiples reacciones bioquímicas que utilizan el carbono y promoviendo la actividad microbiana (Hernández & Moreno, 2018).

Los procesos microbianos de transformación de carbono son la respiración en la zona aerobia, la fermentación, la metanogénesis, la reducción de sulfato, hierro y nitrato en las zonas anóxicas y anaerobias (Hernández, 2010); dichos procesos microbianos determinan los flujos de

carbono en el agua y los flujos de carbono a la atmósfera (CO₂ y CH₄) (Hernández & Moreno, 2018) y las medidas de la respiración en el suelo ayudan a determinar cual es la contribución del suelo al balance del CO₂ en la atmósfera (Rochette & Hutchinson, 2005).

En este orden de ideas, el estudio del carbono en el suelo es un tema que requiere especial atención en el marco de la investigación científica que se realiza sobre cambio climático global (Hemes et al., 2019); es por ello que uno de los parámetros que se evalúan en los procesos edáficos, es el estudio de la biomasa microbiana, asociada con el ciclaje de nutrientes, la descomposición de la materia orgánica, calidad del suelo, entre otras (Hinostroza, Malca, & Suarez, 2013).

De otro lado, los humedales tropicales ubicados en elevaciones intermedias (entre los 1.000 y los 3.000 m) no han sido suficientemente descritos en términos de sus procesos edáficos (Roa & Brown, 2016), y no existen instrumentos de gestión que reconozcan el valor de los bienes y servicios que aportan los humedales de agua dulce, dentro de los cuales se incluyen humedales arbóreos y herbáceos, proveyendo importantes servicios ambientales de regulación, como el mejoramiento de la calidad del agua y el secuestro de carbono, por lo cual que es importante conocer la dinámica del carbono en estos ecosistemas (Hernández & Moreno, 2018). Con el presente trabajo se pretende contribuir al conocimiento en el contexto de la actividad microbiana asociada al carbono en suelos del complejo de humedales de la quebrada Dalí, dado que la conservación y restauración de humedales puede llegar a ser una manera necesaria de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto puede ser potenciado y llevado a escalas internacionales mediante una estimación veraz de la importancia de los humedales para el ciclo mundial del carbono. Sin embargo, cabe aclarar que, en la presente investigación se estudió el suelo en condiciones experimentales de laboratorio, sin la cobertura vegetal, tal y como lo sugiere la metodología llevada a cabo, por lo tanto, la estimación de la actividad microbiana se analizará

bajo las condiciones experimentales para los tres sitios de muestreo del complejo de humedales de la quebrada Dalí bajo la cobertura vegetal predominante en cada área.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Estimar la actividad microbiana asociada al carbono del suelo, en tres sitios de muestreo perteneciente a la zona radicular de 3 especies vegetales diferentes ubicados en el complejo de humedales de la quebrada Dalí.

2.2. Objetivos específicos

- Estimar la actividad microbiana asociada al carbono en suelos en tres sitios de muestreo del complejo de humedales de la quebrada Dalí, representada por la respiración basal.
- Estimar la biomasa microbiana asociada al carbono en el suelo a partir de la respiración inducida por sustrato en tres sitios de muestreo con la cobertura vegetal predominante en cada sitio, en el complejo de humedales de la Quebrada Dalí.
- Analizar los suelos del humedal de la Quebrada Dalí en cuanto a algunas de sus características fisicoquímicas.
- Estimar cuantitativamente hongos, microorganismos heterotróficos y microorganismos celulolíticos.

3. Pregunta de investigación

¿En cuál de los tres sitios de muestreo estudiados bajo las tres especies vegetales predominantes del humedal de la quebrada Dalí, el suelo presenta la materia orgánica de más fácil descomposición?

4. Marco teórico

4.1. Humedales

Históricamente, el término humedales se ha asociado con pantanos repletos de seres viscosos donde se alojan enfermedades; de hecho, esta noción ha dado lugar a la desecación o conversión de muchos de ellos para dedicarlos a la agricultura intensiva, la acuicultura, la industria o la vivienda o para promover la salud pública (Barbier, Acreman, & Knowler, 1997).

En este sentido, y ante la creciente pérdida de humedales, han surgido diferentes iniciativas encaminadas a detener estos procesos; es así como en 1971, la adopción de la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional, en Ramsar, Irán, y su subsecuente ratificación por parte de 131 países, representa un reconocimiento mundial sobre la importancia y los beneficios que ofrecen estos ecosistemas (Ambiente, 2002).

El término “humedal” que usa la Corporación autónoma regional de Risaralda (CARDER) es la establecida por la Convención Ramsar, definiendo a los humedales como “*Extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros*”. Esta definición es acogida por la legislación interna Colombiana (Ramsar, 1971) y se desarrolla en la Política Nacional para Humedales interiores de Colombia (Ambiente, 2002).

De acuerdo con el concepto de humedal, se puede decir que, en Colombia cuenta con cerca de 20.000.000 de hectáreas de humedales representados por ciénagas, pantanos y turberas, madres viejas, lagunas, sabanas y bosques inundados, proveyendo múltiples bienes y servicios para el

desarrollo de las actividades económicas, así como a las comunidades locales (Ambiente, 2002). Sin embargo, los estudios relacionados con los humedales interiores son relativamente escasos, parciales o puntuales y se han direccionado casi que únicamente al manejo de los mismos (Lasso, Gutierrez, y Morales, 2014). En cuanto a la ecorregión Eje Cafetero, a pesar de poseer una gran variedad de ecosistemas, se evidencia un alto grado de intervención y degradación de los mismos, como es el caso del bosque seco tropical y los humedales (CARDER, 2011).

Es importante mencionar que Colombia hace parte de los 163 países firmantes del Convenio Ramsar sobre humedales, corroborando este convenio mediante la Ley 357 de 1997, y desde ese momento se han establecido diferentes acciones para la conservación y uso sustentable de los diversos tipos de humedales, incluidos cuerpos de agua naturales y artificiales (Mosquera, Nieto, Tapia, y Delegados de las comunidades étnicas y locales, 2015).

4.2. Tipo de humedales

En general, se reconocen cinco tipos de humedales principales:

- marinos (humedales costeros, inclusive lagunas costeras, costas rocosas y arrecifes de coral);
- estuarinos (incluidos deltas, marismas de marea y manglares);
- lacustres (humedales asociados con lagos);
- ribereños (humedales adyacentes a ríos y arroyos); y
- palustres (es decir, “pantanosos” - marismas, pantanos y ciénagas)

La Convención de Ramsar ha adoptado un Sistema Ramsar de Clasificación de Tipos de Humedales que incluye 42 tipos, agrupados en tres categorías: humedales marinos y costeros,

humedales continentales y humedales artificiales (Ramsar, 1971), como se mencionan en la Tabla

1. Clasificación de los humedales naturales según la Convención Ramsar.

Tabla 1. Clasificación de los humedales naturales según la Convención Ramsar. (Ambiente, 2002)

Ámbito	Sistema	Subsistema	Clase	Subclase
Marino y Costero	Marino	Submareal		Aguas marinas someras
		---	Lecho acuático	Lecho marino
			Arrecife	Arrecifes de coral
	Estuarino	Submareal	Aguas estuarinas	---
		Intermareal	No consolidado	Planos Lodosos Intermareales
			Emergente	Pantanos salados
			Boscoso	Manglares
	Lacustre/ Palustre	Permanente / Estacional	---	Lagunas salinas y salobres
				Lagunas costeras dulces
	Interior	Fluvial	Perenne	---
Emergente				
Ríos/ arroyos intermitentes				
Lacustre		Permanente	---	Lagos dulces permanentes
		Estacional	---	Lagos dulces estacionales
		Permanente/ Estacional	---	Lagos y pantanos salinos Permanentes/ estacionales
Palustre		Permanente	Emergente	Pantanos y ciénagas dulces Permanentes
				Turberas abiertas
				Humedales alpinos y de tundra
				Pantanos arbustivos
		Boscoso	Bosque pantanoso dulce	
			Turbera boscosa	
Estacional		Emergente	Ojos de agua oasis	
Geotérmico		---	---	Ciénaga estacional dulce
			Humedales geotérmicos	

4.3. Función e importancia de los humedales

Los humedales son ecosistemas críticamente importantes que reportan beneficios sociales, económicos y ambientales apreciables. Se caracterizan por un número elevado de nichos ecológicos, alojan un porcentaje apreciable de la diversidad biológica del mundo y dependen en alto grado de los niveles de agua, por ende, los cambios en las condiciones climáticas que afectan a la disponibilidad de agua influirán fuertemente en el carácter y la función específica de estos ecosistemas, así como en las especies de flora y fauna (Alvarado et al., 2006) Algunas de las funciones comprenden el almacenamiento de agua, la recarga de acuíferos, la protección contra tormentas, la mitigación de tormentas, la estabilización de las costas, el control de la erosión y la retención de carbono, nutrientes, sedimentos y agentes contaminantes. Los humedales producen asimismo bienes de un valor económico apreciable, como agua salubre, recursos ictiológicos, madera, turba, recursos y posibilidades turísticas (Bergkamp & Orlando, 1999). Por naturaleza, son altamente dinámicos, sujetos a diferentes factores naturales que determinan sus modificaciones en el tiempo. Asimismo, las propiedades químicas y biológicas pueden variar a través del tiempo de manera natural, bien sea a través de la evolución biocenótica de cada humedal o mediante procesos originados en otros puntos de la zona de captación cuyos efectos se expresan en la dinámica del humedal; uno de ellos es la acumulación de material orgánico, los procesos de eutrofización y acidificación y la invasión de especies que atraviesan barreras biogeográficas de manera accidental (Naranjo , Andrade, & Ponce de León, 1999), es por ello que se considera su importancia por su potencial para almacenar carbono, el cual se encuentra asociado a su alta productividad y la baja descomposición de la materia orgánica que ocurre en estos suelos inundados (Alvis & Villasante, 2018). Sin embargo, la función de los humedales en el ciclo

mundial del carbono se conoce en escaso grado y se necesita más información sobre los distintos tipos de humedales y su función como fuentes y sumidero de gases de efecto invernadero (Bergkamp & Orlando, 1999), por lo tanto, para evaluar el potencial de los humedales naturales como fuentes y sumideros y la conversión de humedales hay que tener en cuenta los flujos de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). Todos estos procesos naturales determinan en buena medida las funciones de los humedales y, por supuesto, condicionan la derivación de sus valores y servicios (Naranjo et al., 1999).

Los procesos de antrópicos en los humedales no son independientes de la dinámica natural de estos sistemas. Este impacto debe verse como una perturbación que actúa sobre la dinámica natural del sistema y cuyo efecto depende del estado de éste y de su resiliencia o capacidad de retornar al estado de pre-perturbación (aspectos internos) (Naranjo et al., 1999).

4.4. Servicio ecosistémicos en humedales

Las funciones ecosistémicas están ligadas directamente a su tipología, y a sus componentes estructurales (Resl & Restrepo, 2014). La capacidad funcional de un ecosistema de humedal y la de proveer bienes y servicios depende de las características de los componentes, la estructura y los procesos que tienen lugar en lo ecosistemas (Kandus, et al., 2011). Estos proporcionan al hombre una amplia gama de servicios ecosistémicos que contribuyen al bienestar humano; como provisión de alimento y materiales vegetales, abastecimiento y depuración de agua, regulación del clima, control de inundaciones, protección de costas, oportunidades de recreación, turismo (Resl & Restrepo, 2014), al mismo tiempo, desempeñan una función importante en el ciclo global del carbono, pues además representan el mayor componente de la acumulación de carbono terrestre (Alvarado et al., 2006).

Desde la década de 1980 se viene reconociendo el papel fundamental que juegan los humedales en el ciclo de carbono, se tiene que los humedales pueden ser responsables de retener hasta el 40 % del carbono terrestre del mundo participando en el reciclaje del carbono atmosférico de dos maneras: al capturarlo y transformarlo en materia viva durante la fotosíntesis, y al secuestrarlo en el suelo; presentan altas tasas de emisión de metano (CH₄) y un alto potencial de secuestro de CO₂ mediante la formación de turberas, deposición de sedimentos, y en la producción de biomasa de las plantas (Alvis & Villasante, 2018).

En la 12^a reunión de la conferencia de las partes en la convención sobre los humedales, en Punta este, Uruguay en 2015, se definió que los humedales siguen disminuyendo a escala mundial, tanto en extensión como en calidad. Como resultado de ello, disminuyen los servicios de los ecosistemas que los humedales proporcionan a la sociedad. Se instó a las Partes Contratantes y a sus responsables de políticas a tomar medidas inmediatas para cumplir con el objetivo de la Convención de Ramsar de detener e invertir la pérdida y degradación de los humedales y de los servicios que prestan a las personas (RAMSAR, 2015).

4.5. Función de los humedales en ciclo del carbono

La dinámica de los ecosistemas terrestres depende de las interacciones entre el ciclo del C, los ciclos de nutrientes y el ciclo hidrológico, los cuales pueden resultar modificados por actividades humanas. Los sistemas ecológicos de la Tierra por medio de los cuales el carbono queda retenido en la biomasa viva, en la materia orgánica en descomposición y en el suelo, desempeñan un papel importante en el ciclo global de carbono (Rojas et al., 2017). En los humedales existen dos grandes almacenes de carbono: el almacenado en la biomasa aérea de

árboles o vegetación herbácea (hojas, tallos, troncos y ramas) y en la biomasa subterránea (raíces), así como el carbono de la materia orgánica almacenada en el suelo. Los flujos de carbono en humedales comprenden la caída de hojarasca en humedales arbóreos, la exportación de carbono disuelto en agua y la emisión de gases como bióxido de carbono y metano (Hernández, 2010). La descomposición del carbono orgánico en los humedales es un proceso complejo que envuelve procesos aeróbicos y anaeróbicos. La oxidación de la materia orgánica es lenta bajo condiciones anaerobias, lo que ocasiona una acumulación de materia orgánica en los sedimentos de los humedales, que a su vez depende del balance entre las entradas (materia orgánica autóctona producida en el humedal) más la materia orgánica alóctona (producida *ex situ*), menos las salidas de la materia orgánica. Las salidas se deben a la descomposición bajo condiciones de inundación, la erosión y exportación de compuestos solubles y en suspensión (Hernández & Moreno, 2018). Múltiples reacciones bioquímicas que utilizan carbono se llevan a cabo en los humedales debido a la gran cantidad de materia orgánica, lo que promueve la actividad microbiana. Los procesos microbianos de transformación de carbono son la respiración en la zona aerobia, la fermentación, la metanogénesis, la reducción de sulfato, hierro y nitrato en las zonas anóxicas y anaerobias (Hernández, 2010). Dichos procesos microbianos determinan los flujos de carbono en el agua y los flujos de carbono a la atmósfera (CO_2 y CH_4) (Hernández & Moreno, 2018). Parte del carbono del suelo vuelve a la atmósfera mediante la mineralización del carbono orgánico (Burbano, 2018).

4.6. El ciclo del carbono

El carbono es el cuarto elemento químico más abundante en el universo y forma parte de todas las moléculas orgánicas como la glucosa, las proteínas y los ácidos nucleicos, sus características químicas le confieren una gran variabilidad para la construcción de moléculas que

forman los componentes básicos de los seres vivo (Alvis & Villasante, 2018). El carbono, por ser un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, se obtiene de la atmósfera por medio de la fotosíntesis (Rochette & Hutchinson, 2005), en su mayor parte como dióxido de carbono, existiendo también en los océanos y los combustibles fósiles (carbón petróleo y otros hidrocarburos), renovándose en la atmósfera cada 20 años gracias a los mecanismos de respiración de las plantas y a la actividad de los microorganismos del suelo (Alvis & Villasante, 2018).

El carbono del suelo abarca el carbono orgánico, el carbono inorgánico y el carbón vegetal. El bicarbonato, un tipo de carbono inorgánico, está presente en los suelos calcáreos, pero es insignificante en los suelos neutros y ácidos. El principal tipo de carbono en el suelo se encuentra en diversas etapas de humificación, y los plazos de recambio llegan hasta cientos (o incluso miles) de años. En las turberas, los plazos de recambio pueden alcanzar los miles de años (Capítulo 5. Medición del Carbono de los usos de la tierra).

El concepto de ciclo del carbono recoge el flujo del carbono y los procesos físicos, químicos y biológicos que lo controlan entre los diferentes almacenes de ese elemento del sistema tierra (Alvis & Villasante, 2018). A nivel mundial, el carbono se cicla a través de los 4 depósitos principales de C: la atmósfera, los suelos, los océanos y otros ambientes acuáticos, así como los sedimentos y las rocas, siendo estos dos últimos en donde se encuentra el mayor depósito (Frioni, 2005). El intercambio de carbono entre el reservorio terrestre y el atmosférico es el resultado de procesos naturales como la fotosíntesis y la respiración, así como de la emisión de gases de origen antrópico (Burbano, 2018).

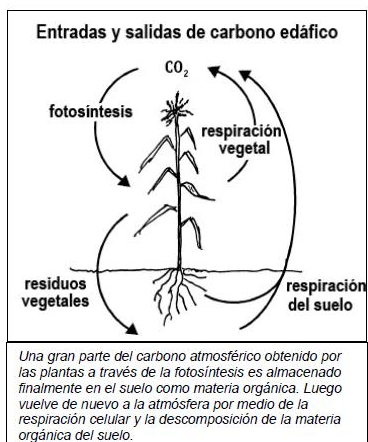


Figura 2. Entradas y Salidas del Carbono Edáfico, por Lessard, Gignac, y Rochette, 2005

El ciclo del carbono se inicia con la fijación del dióxido de carbono atmosférico mediante la fotosíntesis que realizan las plantas y algunos microorganismos. En la fotosíntesis, el dióxido de carbono y el agua reaccionan para formar carbohidratos y a la vez, liberar oxígeno, que va a la atmósfera, como se muestra en la Figura 2. Una parte de los carbohidratos se consumen directamente para proporcionar energía a la planta y el dióxido de carbono formado se libera a través de sus hojas o de sus raíces. Otra parte la consumen los animales, que también liberan dióxido de carbono en sus procesos metabólicos. Las plantas y los animales muertos, en últimas, son descompuestos por los microorganismos del suelo y por ello el carbono de sus tejidos se oxida, forma dióxido de carbono y retorna a la atmósfera (Orellana, Sandoval, Linares, García, & Tamariz, 2012).

En los humedales existen dos grandes almacenes de carbono: el que está acumulado en la biomasa aérea de árboles o vegetación herbácea (hojas, tallos, troncos y ramas) y en la biomasa subterránea (raíces), así como el carbono de la materia orgánica almacenada en el (Hernández & Moreno, 2018).

4.7. Calidad del suelo en humedales

La calidad ambiental de un humedal es un conjunto de características o propiedades inherentes del mismo que permite hacer comparaciones con otros humedales con el fin de hacer un equivalente en función de su estado de conservación. Desde un punto de vista económico la calidad ambiental de un humedal está basada en la importancia o calidad de los recursos naturales que este le genere al hombre (Hernández, 2015). Y en materia ecológica la calidad está dada por el mantenimiento del estado de sus procesos o dinámicas de funcionamiento (Ortega, Martínez, & Padilla, 2003).

Una de las actividades antrópicas que generan impactos altamente negativos sobre los humedales es la deforestación, debido al aumento de esta actividad se ha evidenciado una seria fragmentación de los hábitats, en especial los humedales los cuales se ven afectados en cuanto a su flora su fauna y por lo tanto se ven afectados los servicios ambientales que este tipo de ecosistemas ofrecen (Poletta, 2011). Uno de los recursos que se ve gravemente afectado en los diferentes ecosistemas, en especial en los humedales, teniendo en cuenta que estos son ecosistemas frágiles, es el suelo; este es un recurso natural viviente, dinámico y no renovable que ofrece una gran cantidad de bienes ecosistémicos como la producción de alimentos y el mantenimiento de la calidad ambiental local, regional y global. Los procesos que realizan los diferentes suelos en cuanto al balance entre la producción y el consumo de CO₂ resultan ser de gran importancia en los diferentes procesos dinámicos que se llevan a cabo en los diferentes suelos. Las etapas esenciales de los ciclos globales del agua, C, N, P y S suceden en el suelo, la velocidad del ciclaje y la disponibilidad de estos elementos están siendo alteradas continuamente por las diferentes formas de vida y por la constante búsqueda de fuentes de alimento y energía (Cerón & Melgarejo, 2005).

La salud y calidad del suelo abarca entonces tres características importantes: biológicas, físicas y químicas; mientras que la salud de los suelos está determinada por sus características ecológicas. Un ecosistema saludable está definido por la interacción entre los ciclos de los nutrientes y los flujos de energía, y por las capacidades de resiliencia y resistencia frente a alteraciones que pueden afectar sus características fisicoquímicas y biológicas (Cerón y Melgarejo, 2005).

4.8. Materia orgánica del suelo

La materia orgánica es un indicador importante de la calidad del suelo, tanto en sus funciones agrícolas, como en sus funciones ambientales, entre ellas captura de carbono y calidad del aire. La materia orgánica activa, representada alrededor del 10-20 % de la materia orgánica total del suelo (FAO, Captura de Carbono en Suelos para un Mejor Manejo de la Tierra, 2002), está constituida por la microbiota edáfica, responsable de los procesos de descomposición, este proceso es inherente a todos los microorganismos heterotróficos y generalmente su tasa o velocidad de descomposición indica el nivel de la actividad microbiana de un suelo. Una de las maneras de medir la descomposición es el consumo de O_2 o el desprendimiento de CO_2 (Paolini, 2018). Es por ello, que la medición de CO_2 respirado es una estimación de la actividad y, por lo tanto, de la presencia microbiana (Mora, 2006). Es importante destacar que la respiración de dichos microorganismos es fundamental, dado que cierran el ciclo del carbono en los ecosistemas terrestres, retornándolo a la atmósfera en forma de CO_2 (Paolini, 2018).

La descomposición de material orgánico en un humedal es un mecanismo complejo que involucra procesos aerobios y anóxicos /anaerobios. En los suelos de humedales, los promedios de

descomposición de material orgánico suelen ser bajos por las condiciones anaerobias, por lo que su potencial de almacenamiento de C es alto (Marín et al., 2011).

El carbono orgánico del suelo (COS), es el principal componente de la materia orgánica del suelo (MOS). La pérdida de este indica en cierto grado la degradación del suelo. Por lo tanto, la pérdida o aumento de COS puede aumentar o disminuir las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, mitigando o no el cambio climático (FAO, 2017).

4.9. Actividad microbiana del suelo relacionada con el carbono

Las actividades enzimáticas del suelo se han propuesto como potenciales dentro de un conjunto de indicadores de salud y calidad, debido a su relación con la biología del suelo, ya que su presencia depende directamente de su continua liberación al ambiente, llevada a cabo esencialmente por la actividad microbiana del suelo (Cerón & Ramírez, 2011), mediante procesos catabólicos proporcionando moléculas simples, ATP, energía calórica y CO₂. El Otro proceso llevado a cabo por la rizosfera del suelo es el anabólico que acompleja e inmoviliza las moléculas simples en estructuras de los microorganismos, generando la biomasa microbiana del suelo (BMS) (Sánchez, Rojas, Pérez, Zúñiga, y Gascó, 2006).

La actividad microbiana del suelo puede ser estimada indirectamente con la determinación de la respiración basal (Hinojosa et al., 2013). Esta respiración se fundamenta en la producción de CO₂ resultante de dos procesos: la ruptura u oxidación de la materia orgánica rica en carbono realizada por los microorganismos aeróbicos del suelo (Burbano, 2018), que utilizan O₂ como aceptor final de electrones hasta la formación de CO₂ (Krebs, 2003) y la respiración de las células

de las raíces de las plantas (Burbano, 2018). La respiración es uno de los parámetros más antiguos para cuantificar la actividad microbiana (Hinostroza et al., 2013).

La tasa de producción de CO₂ es importante porque es indicativa de la tasa de descomposición de la materia orgánica del suelo y, en consecuencia, de la cantidad de carbono que se pierde del sistema suelo. Las medidas de la respiración del suelo, ayudan a determinar la contribución del suelo al balance del CO₂ en la atmósfera (Burbano, 2018).

La respiración edáfica entonces, juega un papel crítico en la determinación de un amplio rango de fenómenos ecológicos que van desde el funcionamiento individual de las plantas hasta la concentración global de CO₂ atmosférico. Además, está regulada por una serie de factores bióticos y abióticos tales como la temperatura, el contenido hídrico, el inventario de nutrientes, la estructura de la vegetación, la actividad fotosintética o el desarrollo fenológico de la planta, así como la biomasa de raíces finas y microbiana (Ochoa & Burneo, 2015). Un índice elevado de respiración del suelo es indicativo de una elevada actividad biológica y puede ser buen signo, indicativo de una rápida descomposición de residuos orgánicos hacia nutrientes disponibles para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, la descomposición de la materia orgánica estable es perjudicial para diversos procesos físicos y químicos tales como agregación, intercambio catiónico y capacidad de retención de agua (Hinostroza et al., 2013).

Otro parámetro microbiológico que se mide adicionalmente a la respiración basal es la biomasa microbiana (C_{mic}), que cuantifica la cantidad global de microorganismos presentes en un suelo, es decir, el tamaño de la comunidad microbiana presente en el suelo, por ello, se considera el componente vivo de la MOS y representa entre el 1 al 4% del carbono orgánico total (COT) del suelo (Paolini, 2018). Comprende una fuente potencial de C, N, P y otros nutrientes

para las plantas, la biomasa microbiana de carbono, sirve como indicador de la actividad microbiana y su relación con el elemento carbono (Hinostroza et al., 2013); por su parte, la estimación de la respiración del suelo da una idea de la dinámica de su biota y, por lo tanto, de los procesos metabólicos que en él se desarrollan; tales procesos varían en función de factores biofísicos y climáticos del suelo y del uso de la tierra, por lo cual su medición es un indicador de la biomasa microbiana presente (Mora, 2006). El estudio de la biomasa microbiana del suelo (BMS) es de fundamental importancia para estudiar un rango diverso de procesos edáficos, incluyendo aquellos involucrados en el ciclaje de nutrientes, la descomposición de la materia orgánica, calidad de suelo y para aplicaciones de modelamiento y monitoreo. En cuanto a la materia orgánica, esta nos da información sobre la cantidad de carbono orgánico presente en el suelo (Hinostroza et al., 2013).

5. Materiales y métodos

5.1. Localización y descripción del área de estudio

El área de estudio está ubicada en la Vereda San José, Municipio de Santa Rosa de Cabal, en el predio Lisbrán, propiedad del municipio de Pereira, administrada por la empresa de acueducto y alcantarillado Aguas y Aguas, este predio hace parte de la cuenca baja de la microcuenca de la quebrada Dalí ($4^{\circ}44'19,5''N - 75^{\circ}35'00,9''W$). La microcuenca de la Quebrada Dalí cuenta con un área de 430 Ha, encontrándose en un rango altitudinal entre los 1750 a 2700 msnm, (Figura 3 y 4) destinado a la protección de los recursos naturales (Walteros, 2016). El presente trabajo se desarrolló en la zona media de planicie inundable con una altura sobre el nivel de mar entre 1860 a 1980 m.s.n.m., en donde se encuentra un complejo de humedales (Figura 3), esta es la zona de afectación principal, la cual tiene un área de 13 Hectáreas que fue perturbada con plantaciones de Pino y zanjas de drenaje para la ganadería, actualmente se vienen desarrollando diferentes actividades académico-investigativas para establecer el estado ecológico de la microcuenca, así como por parte de los dueños del predio (empresa de acueducto y alcantarillado de Pereira) se estableció un acompañamiento al procesos de sucesión natural que se presenta allí después de más de 8 años de inactividad productiva y comercial (Bermúdez, 2016).



Figura 3. Complejo de Humedales y Quebrada Dalí por Valencia, Rodríguez, Arias, y Castaño, 2017.

Este complejo de humedales se encuentra formado por matorrales pantanosos inundados en época de lluvias, así como pantanos con vegetación palustre, juncos y carrizos, con zonas de poca profundidad, acumulación de sedimento y con especies vegetales dominantes como: *Eleocharis acutangula*, *Hydrocotyle umbellata*, *Eleocharis acicularis* y *Pennisetum clandestinum* (Walteros, 2016).

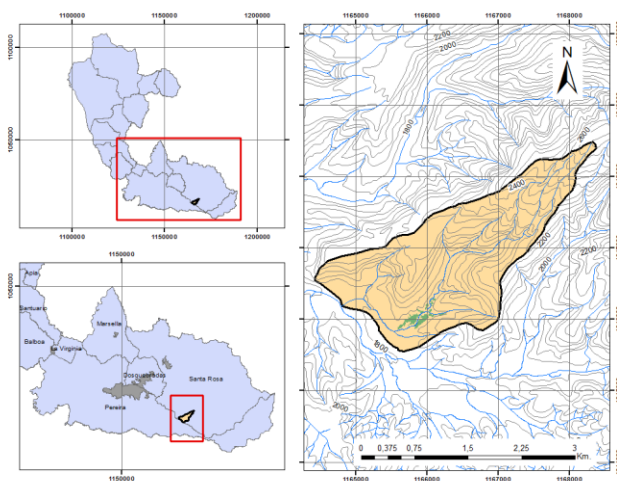


Figura 4. Mapa del Área de Estudio, Complejo de Humedales y Quebrada Dalí por Valencia, Rodríguez, Arias, y Castaño, 2017.

5.2. Muestreo

En el presente trabajo, se consideró realizar el muestreo teniendo en cuenta el diseño experimental ya establecido por el Grupo de Ecología, Ingeniería y Sociedad de la Universidad Tecnológica de Pereira como se muestra en la figura 5. En donde se puede observar que trazaron un transecto principal por cada uno de los tres ejes principales existentes; seguidamente por cada uno de los transectos se generaron puntos cada 20 metros, seleccionando aleatoriamente un punto de inicio y de allí en adelante, se escogieron puntos cada 100m; en cada punto de los que fueron elegidos se interceptó una línea perpendicular donde se obtuvieron 1 o 2 transectos secundarios, según la geometría del humedal; seguidamente se generaron puntos cada 5m a lo largo de las líneas

secundarias; para cada línea secundaria se eligió un punto aleatorio de inicio y a partir de este, puntos cada 20 metros; estos puntos cada 20 metros son las parcelas. En total se obtuvieron 61 puntos de muestreo. De este diseño experimental se seleccionaron tres (3) parcelas teniendo en cuenta la cobertura vegetal predominante en cada punto (Figura 6), de la siguiente manera:

M1: *Hyparrhenia rufa*, (Cuatro (4) submuestras seleccionados aleatoriamente de los puntos de muestreo del 1 al 5).

M2: *Eleocharis acicularis* (Dos (2) submuestras seleccionados aleatoriamente de los puntos de muestreo del 17 al 21 y otras dos (2) submuestras del 28 al 32).

M3: *Eleocharis acutangula* (seleccionados aleatoriamente de los puntos de muestreo del 22 al 27 dos sub-muestras y del 33 al 38 otras dos).

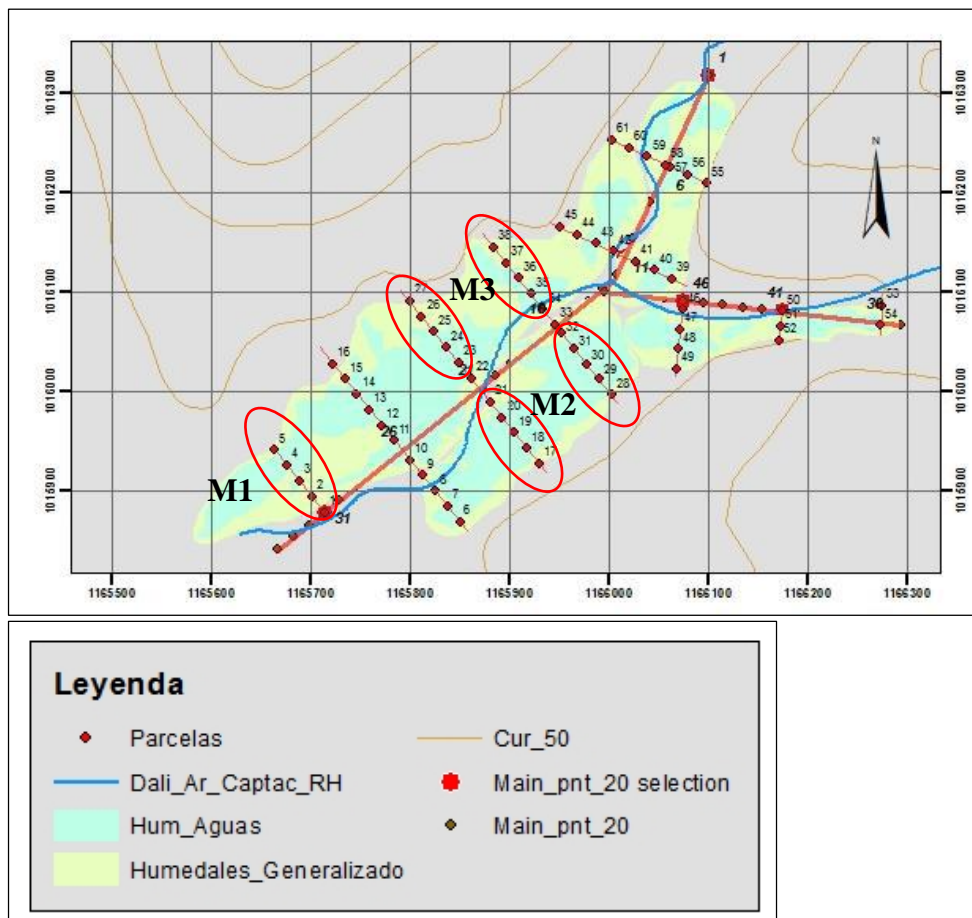


Figura 5. Diseño Experimental de Estudio de la Quebrada Dalí por Grupo de Investigación de Ecología e Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Pereira.

La toma de muestras en campo, se realizó el día 3 de mes de marzo de 2018, para ese día no se presentaron precipitaciones de lluvia. Es importante resaltar que el promedio de precipitaciones en marzo fue de 71,60 mm y en febrero de 2018 se presentaron precipitaciones promedias de 252 mm y en el 2018 de 2174 mm; según lo reportado por la estación hidroclimática EC-Lisbran, según la Red Hidroclimática de Departamento de Risaralda (REDH, s.f.). De las parcelas seleccionadas, se tomaron cuatro (4) submuestras a una profundidad de 0-25 cm, en campo las submuestras se homogenizaron para componerlas en una sola muestra por parcela, para un total de tres (3) muestras de suelo. Se almacenaron por cada muestra dos bolsas ziploc, una para análisis microbiológico y otra para análisis fisicoquímico, como se muestra en la figura 7.

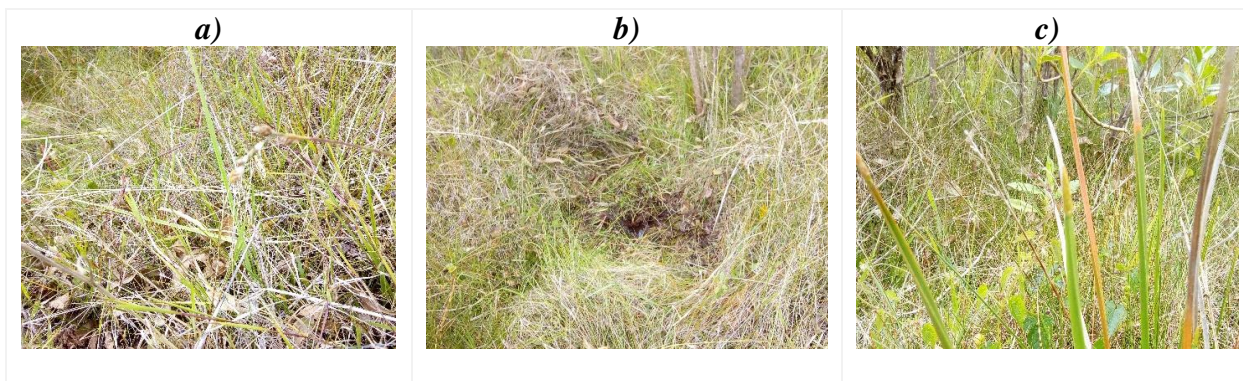


Figura 6. Cobertura Vegetal seleccionadas para estudio: a) *Hyparrhenia rufa* (M1); b) *Eleocharis acicularis* (M2) y c) *Eleocharis acutangula* (M3). *Elaboración propia.*

La calisificación taxonomica de las especies utilizadas se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de las especies vegetales muestreadas.

Taxonomía	M1	M2	M3
Reino	Plantae	Plantae	Plantae
Phylum	Magnoliophyta	Magnoliophyta	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida	Liliopsida	Liliopsida
Orden	Cyperales	Poales	Poales
Familia	Poaceae	Cyperaceae	Cyperaceae
Género	<i>Hyparrhenia</i>	<i>Eleocharis</i>	<i>Eleocharis</i>
Epíteto específico	<i>rufa</i>	<i>aciculais</i>	<i>acutangula</i>

Las muestras se transportaron en bolsas ziploc y refrigeradas hasta el laboratorio. A las muestras compuestas de suelos se les realizó eliminación de raíces, tallos y residuos de desechos, luego se pasaron por tamiz (2 mm) para disgregarlas y finalmente almacenarlas a 4°C.

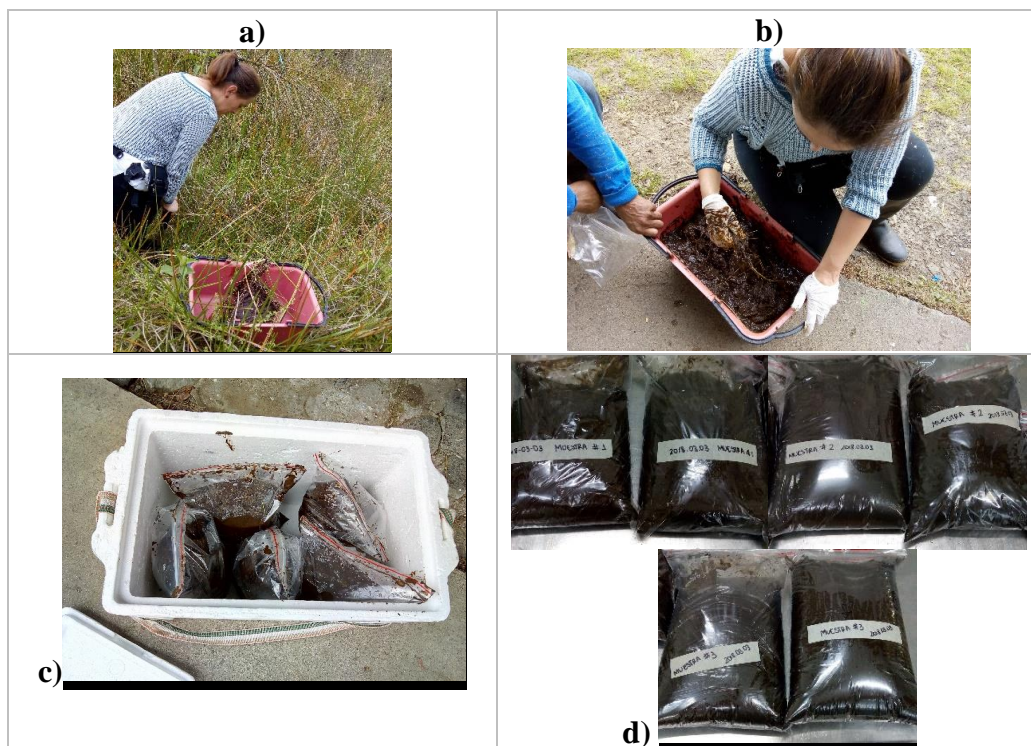


Figura 7. Proceso de Toma de Muestras: **a)** Toma de muestras; **b)** Composición de muestra; **c)** Almacenamiento de muestras; **d)** Rotulación de muestras. Elaboración Propia

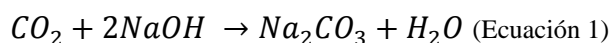
5.3. Determinaciones

5.3.1. Respiración método basal

La metodología utilizada para el desarrollo de esta técnica, fue la estandarizada por Alzate y Campiño, (2014). Se pesaron de cada una de las muestras 20g de suelo en un recipiente plástico en las condiciones de humedad naturales, es decir, luego de realizar el análisis de humedad y capacidad de campo y determinar que no era necesario adicionar agua al ensayo, por los porcentajes altos de humedad presentados en estos suelos de este tipo de humedales (pantano

arbustivos permantente inundados) (Ver numeral 6.2.1). Posteriormente, en un erlenmeyer de vidrio 125mL se adicionaron 10 mL de NaOH 0.8N, el cual fue introducido en el recipiente plástico que contenia la muestra de suelo como se muestra en la figura 8a. El recipiente plástico se selló con paraflim, se taparon e incubaron durante 72 horas a una temperatura de $22 \pm 3^\circ\text{C}$.

El CO_2 liberado durante la incubación (respiración aeróbica) fue adsorbido en solución alcalina y medido como un índice de la tasa de respiración. La reacción se muestra en la ecuación 1:



La cantidad de CO_2 adsorbido es equivalente a la cantidad de NaOH consumido. Para determinar esto, se precipitó el carbonato (CO_3^{2-}) con BaCl_2 y se tituló el remanente NaOH con HCl 0.4N en presencia de fenolftaleína (figura 7c). Se considerará un blanco por cada parcela con el objetivo de controlar la presencia de CO_2 en los frascos.

De la diferencia entre la cantidad de NaOH presente inicialmente y la remanente después de la exposición al CO_2 se obtuvo la cantidad de gas producido por respiración mediante la ecuación 2:

$$R = (B - M) \times NE \text{ (Ecuación 2)}$$

donde:

R = respiración microbiana en mg CO_2

B = volumen de ácido necesario para titular el NaOH del promedio de los blancos (en mL)

M = cantidad de ácido necesaria para titular el NaOH de la muestra (en mL)

N = normalidad del ácido

E = peso equivalente del $\text{CO}_2 = (22)$

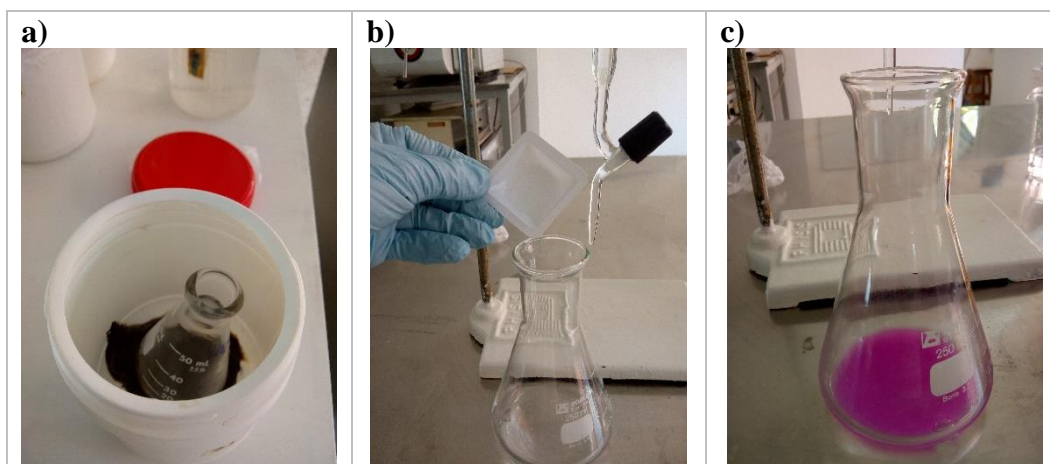


Figura 8. Procedimiento de las Muestras para Análisis de Respiración. a) Incubación b) Muestra antes de titular con adición de cloruro de bario c) punto final de la titulación. Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

5.3.2. Biomasa microbiana por respiración inducida por el sustrato (SIR)

5.3.2.1. Humedad

El método gravimétrico es el único método directo de medición de la humedad del suelo. Dicho método consiste en tomar una muestra de suelo, pesarla antes y después de su desecado y calcular su contenido de humedad. La muestra de suelo se considera seca cuando su peso permanece constante a una temperatura de 105°C (OMS, 2011). Se realizó determinación del contenido de agua de cada una de las muestras compuestas, por diferencia de peso antes y después de secarlas en horno a 105°C por 48 horas, se pesaron aproximadamente 10g de suelo por triplicado de cada una de las muestras en cápsulas tardas previamente a 105°C (figura 9), se colocaron en una estufa BINDER a 105°C durante 24 horas; pasado este tiempo se trasladaron a un desecador

hasta peso constante y finalmente se realizó la lectura del peso final en la balanza OHAUS calibrada.



Figura 9. Determinación de Humedad. Elaboración Propia

El cálculo para determinar la humedad se referencia en la ecuación 3:

$$\%H = (100 \times (W_i - W_f)) \div (W_x) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Dónde:

W_i = Peso de la muestra húmeda + cápsula vacía

W_f = Peso final cápsula + muestra seca

W_x = Peso de la muestra

Todas las mediciones se realizaron en el laboratorio de análisis de aguas y alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira, con equipos calibrados y con reactivos vigentes.

5.3.2.2. Capacidad de Campo

La cantidad de agua retenida luego de un escurrimiento de 2-3 días se denomina capacidad de retención de agua o capacidad de campo (Frioni, 2005), depende fundamentalmente de la textura, cantidad de materia orgánica y grado de compactación de este (Ochoa & Burneo, 2015).

Para la determinación de la capacidad de campo se siguió el procedimiento descrito por Ochoa y Buerneo (2015). Se pesaron 100g de suelo seco y tamizado, se llevó a una probeta de 100mL, se registró el volumen ocupado por esta cantidad de suelo, se adicionaron 5mL de agua (gota a gota) en el centro y se tapó la probeta plástica con vinipel (figura 10 y 11), pasadas 24 horas se observó y registró el volumen del suelo seco remanente, se realizó una sola determinación de capacidad de campo por punto de muestreo y se calculó de la siguiente manera:

$$\%CC = (v1 \div (v1 - v2) \times (5\text{mL de } H_2O \div 100\text{g de suelo}) \times 100 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Dónde:

$v1$ = Volumen inicial (volumen ocupado por los g de suelo)

$v2$ = Volumen final (volumen que ha quedado sin humedad)

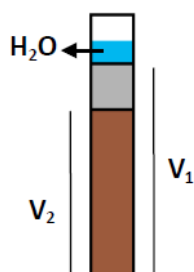


Figura 10. Análisis de Capacidad de Campo, por Gonzáles & Álvarez, 2009.

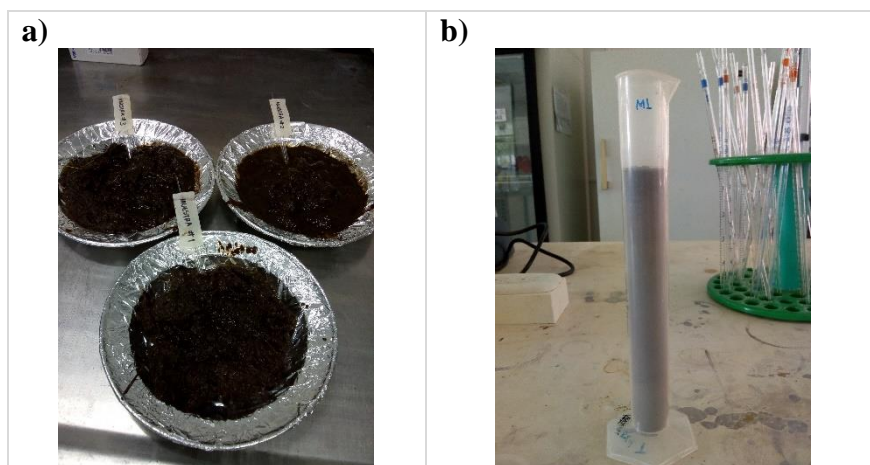


Figura 11. Capacidad de Campo. **a)** Secado de las muestras; **b)** Capacidad de campo. Elaboración Propia.

5.3.2.3. Cantidad de agua a adicionar

Luego de determinar la capacidad de campo y la humedad, se calcula la cantidad de agua necesaria para adicionar al suelo mediante la siguiente ecuación:

$$\text{mL de H}_2\text{O para adicionar} = (g \text{ suelo}) \times (\%CC - \%H) \div (\%H + 100) \quad (\text{Ecuación 5})$$

5.3.2.4. Biomasa microbiana por respiración inducida por el sustrato (SIR)

Antes de iniciar con el procedimiento para la determinación de la Biomasa microbiana fue necesario de haber calculado la capacidad de campo, la humedad y el contenido de agua a adicionar a las muestras, se procedió a determinar la biomasa microbiana de las muestras por el método de respiración por sustrato inducido (SIR). La metodología de respiración inducida por sustrato SIR propuesto por Anderson y Domsch, 1978 (González y Álvarez, 2009), se basa en la estimación de la respiración máxima inicial del suelo después de haber adicionado un exceso de glucosa. La respiración se determina mediante la medida del desprendimiento de CO₂ (Ochoa & Burneo, 2015).

Se pesaron 20g de suelo fresco a capacidad de campo, se mezcló con 0,24g de glucosa más 0,72g de talco, esta mezcla (suelo: glucosa) se colocó en un recipiente de vidrio de boca ancha (figura 12 a), a este recipiente se le introdujo un Erlenmeyer pequeño que contenía 15mL de NaOH 0,05N y un tubo de ensayo con agua. Seguidamente, el recipiente de vidrio se selló herméticamente con parafilm y se ajustó con la tapa, se dejaron a temperatura $22 \pm 3^\circ\text{C}$ por un período de 6 horas. Para esta prueba se realizaron 3 blancos por parcela.

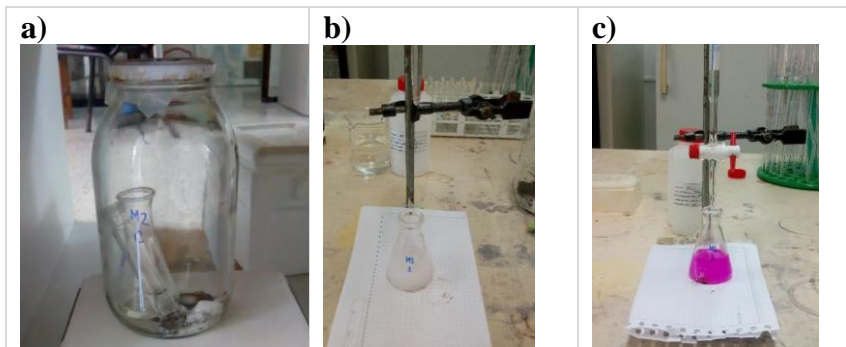


Figura 12. Tratamiento de las muestras para análisis de biomasa microbiana. **a)** Incubación con glucosa; **b)** Muestra antes de titular con adición de cloruro de bario **c)** punto final de la titulación. Elaboración propia

Cumplido este tiempo, se procedió a adicionarle 15mL de cloruro de bario (BaCl_2 0,5N) al recipiente que contenía el hidróxido de sodio (NaOH 0,05N) para continuar con la titulación con ácido clorhídrico (HCl 0,05N); finalmente se calculó de la siguiente manera:

$$CO_2 \text{ mg / Kgh} = \frac{(Vb - Vm) \times N \times 6,6 \times 1000}{Pm \times t} \quad (\text{Ecuación 6})$$

En donde:

Vb = Valoración del blanco

Vm = Valoración de la muestra

N = Normalidad disolución HCl

Pm = Peso de la muestra

t = tiempo

Se usó el factor de conversión propuesto por Beck *et al.* (1995) para el cálculo de la biomasa microbiana:

$$1 \text{ mg C-CO}_2 \text{ } 100\text{g}^{-1\text{ssh}} = 20,6 \text{ mg C}_{\text{mic}} \text{ } 100\text{g}^{-1}\text{suelo seco} \quad (\text{Paolini, 2018})$$

La biomasa microbiana fue calculada tomando en consideración: que 1 mL HCl (0.1M), equivale a 2.2mg de CO₂, y que para un coeficiente de respiración igual a 1, se cumple que: 1mg de CO₂/100 g.h=20.6 mg C-biomasa/100 g (Zabala y Gómez, 2010).

5.3.3. Determinación de pH

Las medidas de pH de los suelos fueron hechas con un potenciómetro marca Thermo, usando un sistema de electrodos sensitivos al pH. El potenciómetro fue calibrado con soluciones estabilizadoras (buffer) de pH conocido. El suelo se secó al aire para tamizarlo y controlar la cantidad de agua presente en el momento de la medición.

Se siguió la metodología descrita por Carrilo P., (1985). Se pesaron aproximadamente 10g de suelo seco al aire en un beaker, se adicionó aproximadamente 10mL de agua destilada (relación 1:1). Se agitaron las muestras durante una hora y se tomó la lectura con pHmetro calibrado (figura 13). Por cada punto de muestreo se realizaron 3 lecturas de pH.



Figura 13. Determinación de pH. Elaboración Propia

5.3.4. Materia Orgánica

En el método seleccionado para análisis de materia orgánica fue el fotométrico, descrito por Carrilo P., 1985, en donde la muestra se trata con una cantidad conocida de K₂Cr₂O₇ (oxidante)

en presencia de un ácido (H_2SO_4). El calor desprendido por la reacción exotérmica del ácido al diluirse, favorece la acción del bicromato para que oxide la materia orgánica. Se desarrolla un color por acción del ácido crómico reducido el cual es proporcional a la materia orgánica oxidada y se determinó por fotometría a 585nm en celda de 1cm.

Se pesaron aproximadamente 0,15g de suelo seco tamizados en malla #30, para finalmente obtener un tamaño de partícula menor a $0,6\mu\text{m}$, se adicionaron 5mL de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 2N y 5mL de H_2SO_4 concentrado, se adicionó 50mL de agua destilada, se dejó en reposo y se midió en espectrofotómetro a 585nm en celda de vidrio de 1cm. Se comparó el color con las lecturas de una curva de calibración (figura 14) preparada de 0 a 100 mg de sacarosa /L, sometidas al mismo tratamiento de las muestras.

Las muestras se analizaron por triplicado por punto de muestreo.



Figura 14. Determinación de Materia Orgánica. a) Estándares para la preparación de la curva de calibración; b) Espectro fotómetro usado. Elaboración Propia.

5.3.5. Análisis Microbiológico

Los análisis microbiológicos se llevaron a cabo en el laboratorio de microbiología del Laboratorio de Análisis de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

El número de microorganismos en una muestra de suelo, es un parámetro importante porque permite evaluar la calidad microbiana. Entre los métodos más empleados está el de dilución del suelo en placa, que fue la metodología utilizada para el recuento de hongos, bacterias y microorganismos celulolíticos. Se pesaron 10g de suelo y se suspendieron en 90mL de solución salina al 0,85% estéril por cada uno de los microorganismos a evaluar, se agitó vigorosamente y, a continuación, se tomaron alícuotas de 1mL para preparar una serie de diluciones sucesivas como se muestra en la figura 15, hasta lograr la dilución final de 10^{-6} (Matsumoto, et al., 2004).



Figura 15. Técnica de recuento en placa por dilución, por Laboratorio Microbiología Industrial, 2017

5.3.5.1. Recuento en placa de Mohos y levaduras

Se utilizó la técnica de recuento en placa (Frioni, 2005). De las diluciones seriadas de 10^{-1} hasta 10^{-6} se tomaron alícuotas de 0,1mL por triplicado de cada una de las parcelas a analizar, se llevaron a cajas de Petri que contenían el agar comercial OGY (oxitetraciclina, gentamicina y extracto de levadura) y se realizó la siembra por superficie con un asa de Hockey, se invirtieron y se incubaron a 25°C durante cinco días, ya pasado este tiempo se realizó el conteo de las unidades formadoras de colonias UFC/g suelo. Del medio de cultivo se preparó adicionalmente un control de contaminación (figura 16).

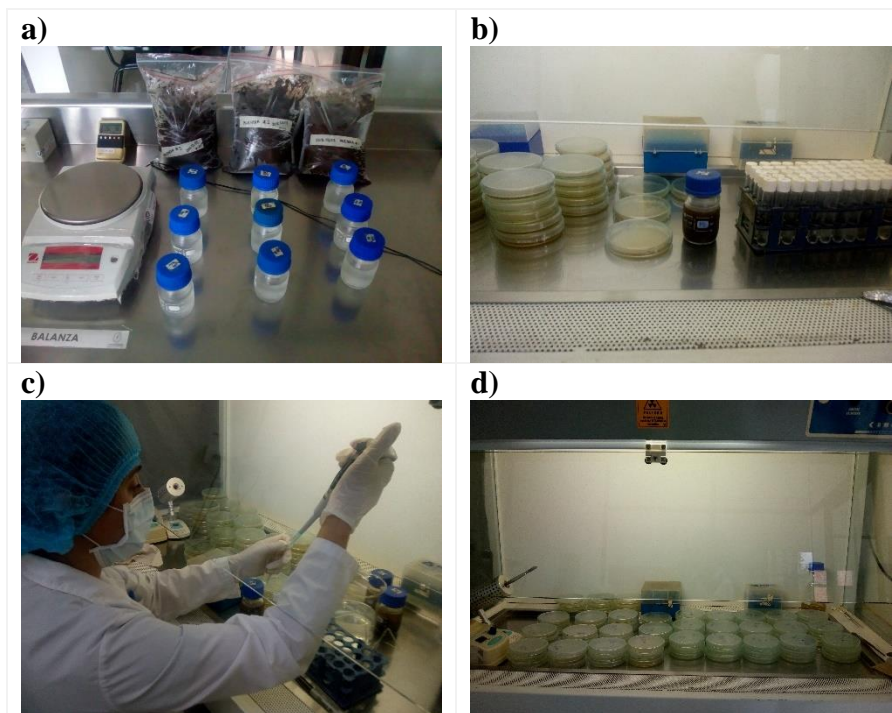


Figura 16. Procedimiento de Siembra por Recuento en Placa. **a)** Preparación solución madre; **b) y c)** Preparación diluciones y **d)** Cajas sembradas por superficie. Elaboración Propia

5.3.5.2. Microorganismos heterotróficos

Para el conteo de microorganismos heterotróficos, se utilizó la técnica de recuento en placa (Frioni, 2005), con medio selectivo comercial TSA (tripticasa de soya), en el cual se realizó la siembra por superficie con asa de hockey de cada una de las diluciones seriada de 10^{-1} hasta 10^{-6} , de cada una de las parcelas se sembró por triplicado cada dilución, se dejaron en incubación a 28°C durante 48 horas, pasado este tiempo se realizó el conteo de las unidades formadoras de colonias UFC/g suelo. Con las muestras se sembró una muestra control, que solo contenía el medio de cultivo.

5.3.5.3. Microorganismos celulolíticos

Para el conteo de microorganismos celulolíticos, se utilizó la técnica de recuento en placa (Frioni, 2005), utilizando el Medio de cultivo definido por Wood (1980) (Anexo 1). Se realizó siembra por superficie con asa de hockey de cada una de las diluciones seriada de 10^{-1} hasta 10^{-6} , de cada una de las parcelas se sembró por triplicado cada dilución, se dejaron en incubación a 28°C durante 48 horas, pasado este tiempo de incubación, el medio de cultivo fue teñido con rojo congo por 15 minutos y posteriormente se lavó con NaCl, repitiéndolo 3 veces. Se realizó el conteo de las unidades formadoras de colonias UFC/g suelo de los microorganismos que presentaron halo de color amarillo-naranjado, lo que indica la presencia de actividad celulolítica (Matsumoto, et al., 2004). Con las muestras se incluyó un control, que solo contenía el medio de cultivo.

5.3.6. Análisis estadístico

Para determinar la influencia de la cobertura vegetal en los tres sitios de muestreo sobre la actividad microbiológica del suelo y analizar si los datos sugerían el modelo de distribución normal se utilizó la prueba de Shapiro Wilk. Para los datos que se ajustaron a una distribución normal (paramétricos), se realizó un análisis de varianza para determinar si entre los suelos del humedal con diferente cobertura vegetal existen diferencias significativas o por el contrario podía suponerse que sus medias poblacionales no diferían. Adicionalmente, se aplicó la prueba de Tukey al 0,05% de probabilidad para determinar entre cuales muestras existían estas diferencias. Para los datos no paramétricos, se realizó la prueba de Kruskal. Para el análisis estadístico se utilizó el programa estadístico InfoStat versión estudiantil gratuita 2018 (InfoStat, 2018).

6. Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos fueron analizados estadísticamente por medio de: a) la prueba de Shapiro Wilk para determinar la distribución normal de los datos, b) análisis de varianza o ANOVA de una vía, c) prueba de Tukey para datos paramétricos, con el fin de determinar si había diferencias estadísticamente significativas entre sitios de muestreo d) prueba de Kruskal Wallis para el análisis de las diferencias estadísticamente significativas de los datos no paramétricos.

6.1. Actividad microbiana

Los resultados obtenidos para la prueba de respiración, siendo uno de los parámetros más frecuentes para evidenciar actividad microbiana, fueron analizados con el software estadístico INFOSTAT versión gratuita estudiantil, por medio del cual fue posible realizar pruebas de ANOVA (Ver Anexo 2 y 3), evidenciando que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre la actividad microbiana en suelos bajo las diferentes coberturas vegetales, como se muestra en la gráfica de la Figura 17. Esto quiere decir que las tasas de respiración entre especies son similares, desde el punto de vista estadístico, aunque se visualiza un decrecimiento de las mismas en cuanto al contenido de la respiración, en el siguiente orden: M1 (*Hyparrhenia rufa*) > M2 (*Eleocharis acicularis*) > M3 (*Eleocharis acutangula*).

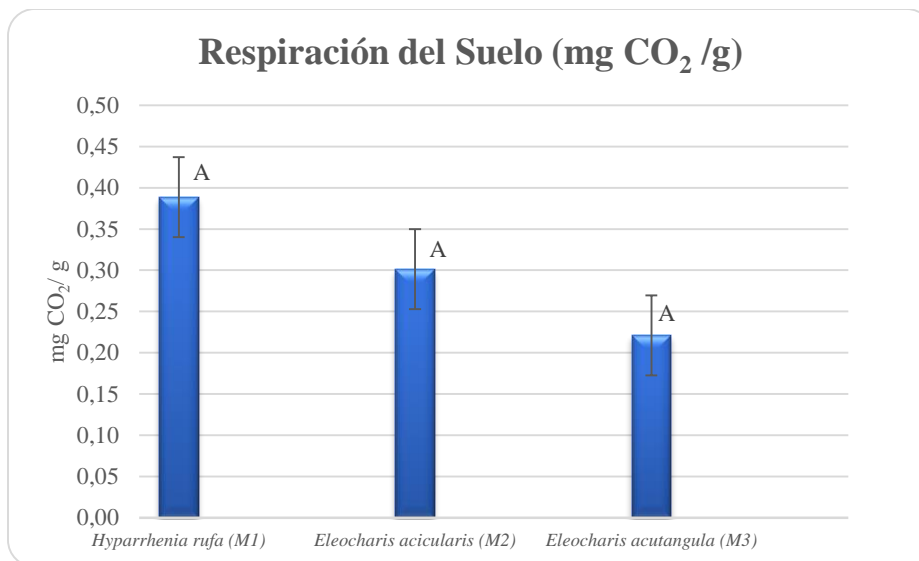


Figura 17. Actividad Microbiana–CO₂ entre muestras bajo diferentes coberturas vegetales (n=3). Valores con la misma letra entre tratamientos no difieren significativamente entre sí. (prueba de Tukey, (P<0.05))

La actividad microbiana puede verse afectada por los contenidos de humedad tal como lo señalan en su estudio Guangxuan, et al. (2018), por tal razón este parámetro fue tenido en cuenta en esta sección, observando diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) para el contenido de humedad entre M1 y M2 y, M2 y M3, respectivamente. Los suelos con coberturas correspondientes a las dos especies del género *Eleocharis* (M2 y M3), presentaron un valor promedio mayor de humedad con respecto al suelo del género *Hyparrhenia rufa* (M3). Este comportamiento coincide con lo reportado por Guangxuan et al (2018), en la investigación llevada a cabo en el delta del río amarillo, con muestras de suelo bajo coberturas diferentes a las estudiadas, hallaron que en condiciones de suelo más húmedos, se limita la difusión del oxígeno y por tanto reduce la actividad microbiana y la producción de CO₂; consecuentemente a medida que disminuye la humedad aumenta la actividad respiratoria (Guangxuan et al., 2018), como se evidenció en los resultados del presente trabajo para la muestra M1 (*Hyparrhenia rufa*) quien presentó el porcentaje de humedad menor de los tres suelos estudiados. (Ochoa & Burneo, 2015) cita en su estudio que a

humedades del 60% la actividad biológica es mayor aumentando la respiración del suelo; mientras que humedades superiores a este valor afectan negativamente la respiración del suelo. Sin embargo, entre las dos muestras del género *Eleocharis* quienes presentan un porcentaje de humedad cercano, no se cumple esta condición, dado que para la muestra M2 con mayor porcentaje de humedad, también se presenta mayor valor de respiración del suelo. El estudio planteado por Guangxuan et al. (2018), en el estudio realizado por Quintín, Montoya y Paz (2015) plantean que una mayor humedad en el suelo estimula la apertura de los estomas y en consecuencia se incrementa la respiración; sin embargo, en este estudio también plantean que, los niveles óptimos de humedad están entre el 40% y 60% de la capacidad de campo, por lo tanto, dado que las condiciones de humedad de los suelos de las muestras M2 y M3 presentan porcentajes de humedad por encima del 90% de la capacidad de campo no se evidenció una correlación de la humedad con los resultados de la respiración. Sin embargo, Guangxuan et al., (2018) plantea en su estudio que, en condiciones de suelo húmedo, como es el caso del presente estudio, a medida que se produce precipitaciones, el suelo se satura o se inunda con un aumento continuo posterior en la humedad del suelo, lo que limita la difusión de O_2 y reduciendo la actividad microbiana y la producción de CO_2 . Los estudios presentados por Hergoualc'h, Hendry, Murdiyarsa, y Verchot (2017), también plantean una respuesta entre dos ecosistemas en los que está relacionada la humedad del suelo.

Otro factor que afecta la respiración es la cobertura vegetal, la presencia de arbustos con raíces y raicillas en la capa edáfica, ayudan a mejorar la circulación del aire en el suelo, por lo tanto, mejoraría la aireación del suelo, ayudando a los microorganismos a tener las condiciones necesarias para una mayor actividad biológica y por ende mayor respiración (Ochoa & Burneo, 2015). Relacionando lo anterior con las coberturas vegetales analizadas, podemos decir que las raíces de la *Hyparrhenia rufa* (M1) son más profundas que las de las de los géneros *Eleocharis*

que son más superficiales, sin embargo, se evidenció una mayor respiración del suelo en la muestra bajo cobertura *Hyparrhenia rufa*.

En este estudio no se midió la temperatura del suelo, sin embargo, en el estudio realizado por Chimmer, 2004, relacionaron la temperatura del suelo y la del aire con la respiración del suelo, encontraron que la respiración se correlacionó más con la temperatura del aire que con la temperatura del suelo (Chimmer, 2004); identificando tasas de respiración mayores en temperaturas más altas. Para el presente estudio la temperatura media del aire, fue similar a un sitio de muestreo del estudio realizado por Chimmer (2004), en donde la temperatura media reportada por la estación meteorológica ubicada en el predio estación: EC-Lisbran fue para el día de la toma de muestra de 17,94°C; sin embargo es importante anotar que las precipitaciones en el sitio del presente estudio están muy por debajo de las reportadas por Chimmer (2004). En otros estudios realizados en Indonesia por Hergoualc'h et al. (2017), también presentaron una relación positiva de la respiración total con la temperatura del aire; en donde la respuesta de la respiración total del suelo fue mayor en temperaturas ambientales altas. Se puede decir entonces que los resultados de la respiración del suelo son bajos dada la temperatura ambiental del sitio de estudio. Lo anterior puede ser atribuido a que los suelos tienen más carbono disponible preservado por las temperaturas frías, que llegaron a estar disponibles para la descomposición durante las incubaciones. A la inversa, los sitios más cálidos se sometieron a una descomposición más completa que dejó poco carbono disponible para la descomposición durante las incubaciones (Chimmer, 2004).

Los resultados de la respiración del suelo asociados a la actividad microbiana en la mayoría de los estudios consultados están reportados en unidades diferentes ($\text{mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) a las obtenidas en este estudio ($\text{mg CO}_2/\text{g suelo}$); es por ello que en este análisis no se comparan los

resultados con otros estudios, adicionalmente, no se evidenció bibliografía que relacionara la actividad microbiana con suelos de humedales tipo pantano arbustivo.

Sin embargo, los resultados presentados por (Alzate & Campiño, 2014) para un suelo proveniente de bosque a profundidad de muestreo 0-25 cm, en la vereda el Manzano a una altura aproximada de 1800 msnm, coinciden con el valor reportado de respiración del suelo de la muestra No. 1, que presenta cobertura de *Hyparrhenia rufa*, con un valor en ambos estudios de 0,39 mg CO₂/g. Esta coincidencia en los valores reportados de respiración del suelo en estos dos ecosistemas, posiblemente se deban a las similitudes propias del clima, altura sobre el nivel del mar y a que ambas muestras presentan suelos derivados de cenizas volcánicas por su cercanía en cuanto a ubicación geográfica; dado que para el presente estudio la altura varía entre 1860 a 1980; es por ello que posiblemente también presentan similitudes en los porcentaje obtenidos de materia orgánica coincidiendo con los reportados específicamente en la muestra No. 1 con valores de 21,4 % MO para la muestra N° 1 y para el suelo del bosque 21,2 % MO. Ochoa y Buerneo (2015) citan en su estudio que los factores ambientales como la humedad y la temperatura ambiente ejercen un control importante en la tasa de emisión de CO₂, por lo tanto, este podría ser el caso de los valores iguales en ambas muestras.

Otro factor que influye en la respiración es la materia orgánica dado que la materia orgánica apoya los procesos de emisión de CO₂ aumentando la respiración, sin embargo, para que esta condición exista, es necesario que todas las condiciones medio ambientales y las características (pH, humedad, nutrientes, biológicas, etc) del suelo sean adecuadas (Ochoa & Buerneo, 2015); para efectos del presente estudio esta condición no se cumple, dado que no existe una relación directamente proporcional con los resultados obtenidos en las 3 muestras de suelo. Esta condición no se cumplió en el estudio realizado en dos ecosistemas diferentes por Ochoa y Buerneo (2015).

(Paolini, 2018) define en su estudio que los altos valores de la respiración basal en los suelos bajo manejo orgánico están relacionados con el mayor contenido de biomasa microbiana de estos suelos. Esto coincide con la relación directamente proporcional que se presenta entre los valores de la respiración y la biomasa microbiana.

6.2. Biomasa microbiana asociada al carbono

Para la estimación de la biomasa microbiana fue necesario primero realizar algunos parámetros fisicoquímicos a tener en cuenta en la metodología utilizada.

6.2.1. Humedad

En los resultados obtenidos de la humedad analizados con el software estadístico INFOSTAT versión gratuita estudiantil como resultado de la prueba de Kruskal Wallis (Ver anexo 3), se encontró $P < 0,05$, lo que significa que por lo menos un grupo de datos se separó del resto de los demás tratamientos, como se puede observar entre las muestras M1 y M2 no hay diferencias estadísticamente significativas y entre las muestras M2 y M3 tampoco se encontraron diferencias estadísticamente significativas, por lo tanto, entre las muestras M1 y M2 si se encontraron diferencias estadísticamente significativas. Sin embargo, se evidencia un valor promedio mayor de humedad en los suelos con coberturas correspondientes a las dos especies del género *Eleocharis* y, por el contrario, la menor humedad para *Hyparrhenia rufa* como se puede observar en la gráfica de la figura 18.

Es importante anotar que el valor del porcentaje de humedad fue necesario calcularlo para analizar la biomasa microbiana asociada al carbono para tener en cuenta dentro de sus cálculos.

Los datos promedio del porcentaje de humedad fueron tenidos en cuenta en los análisis de la respiración y la biomasa microbiana.

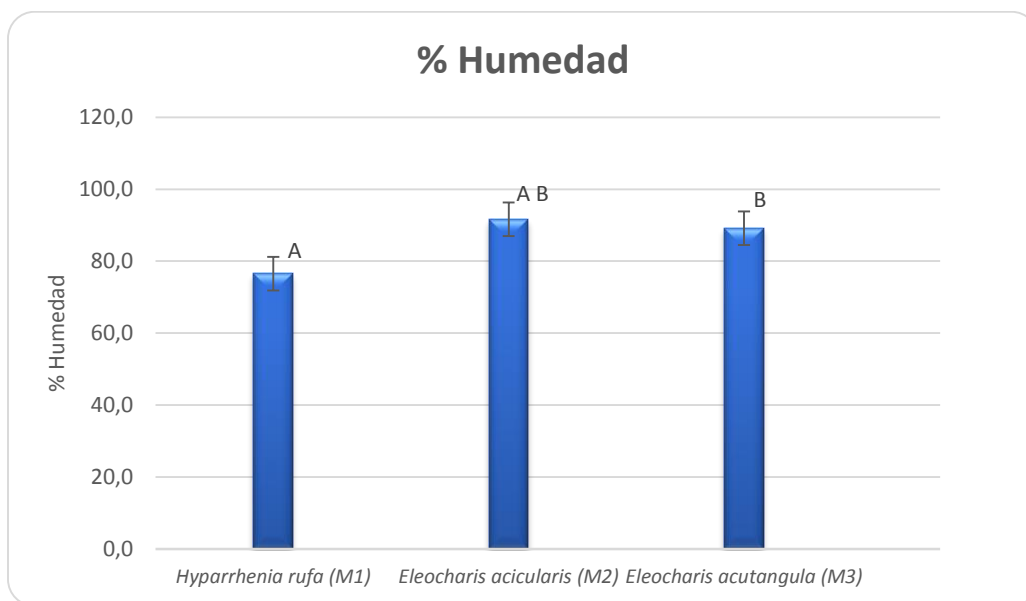


Figura 18. Porcentaje de humedad entre muestras bajo diferentes coberturas vegetales (n=3). Medias con una letra común no son significativamente diferentes (prueba de Kruskal Wallis, (P<0.05)).

6.2.2. Capacidad de Campo

Los resultados obtenidos de la capacidad de campo analizados software estadístico INFOSTAT versión gratuita estudiantil, encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) presentándose un valor promedio mayor de capacidad de campo en los suelos con coberturas correspondientes a las dos especies del género *Hyparrhenia rufa* y por el contrario valores iguales de capacidad de campo para las especies *Eleocharis*.

La respiración de los suelos terrestres es comúnmente entre el 60 –80% de la capacidad de retención de humedad. A este contenido de humedad el suelo muestra un contenido de agua suficiente para la actividad microbiana, ya que algunos poros no están saturados de agua y el aire pueden ingresar para proveer oxígeno (Hinostroza et al., 2013).

La capacidad de campo para la respiración en suelos terrestres está entre el 60 –80% de la capacidad de retención de humedad. A este contenido de humedad el suelo tiene las condiciones óptimas en cuanto al contenido de agua para la actividad microbiana, ya que los poros no se encuentran saturados, y la respiración no queda limitada por el oxígeno (Ochoa & Burneo, 2015). En el presente estudio para los análisis de la respiración se tuvo en cuenta que la capacidad de campo obtenida para las muestras de suelo cobertura *Eleocharis* se obtuvieron valores de capacidad de campo del 80%, es decir por encima del valor que reporta la bibliografía como óptimos, para la muestra con cobertura de la especie del género *Hyparrhenia rufa* se obtuvo un porcentaje óptimo con un valor de 47% de la capacidad de campo.

6.2.3. Cantidad de Agua Adicionar

Luego de haber analizado el contenido de humedad y la capacidad de campo se realizó el cálculo de la cantidad de agua a adicionar en el análisis de biomasa microbiana para cada muestra de suelo para tener un valor fijo de humedad, dado los promedio de los porcentajes de humedad arrojaron resultados por encima del 75% en los suelos de las tres muestras analizadas, los cálculos de cantidad de agua a adicionar dieron negativos; por lo tanto, las muestras fueron analizadas para la biomasa microbiana sin adición de agua.

6.2.4. Biomasa Microbiana por Respiración Inducida por Sustrato

Los resultados obtenidos de la biomasa microbiana del suelo fueron analizados con el software estadístico INFOSTAT versión gratuita estudiantil, con el cual se realizaron pruebas de ANOVA, evidenciando que se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$)

entre la biomasa microbiana asociada al carbono de los suelos bajo las coberturas vegetales correspondientes al género *Eleocharis* (M2 y M3) y *Hyparrhenia rufare* (M1), como se muestra en la gráfica de la figura 19.

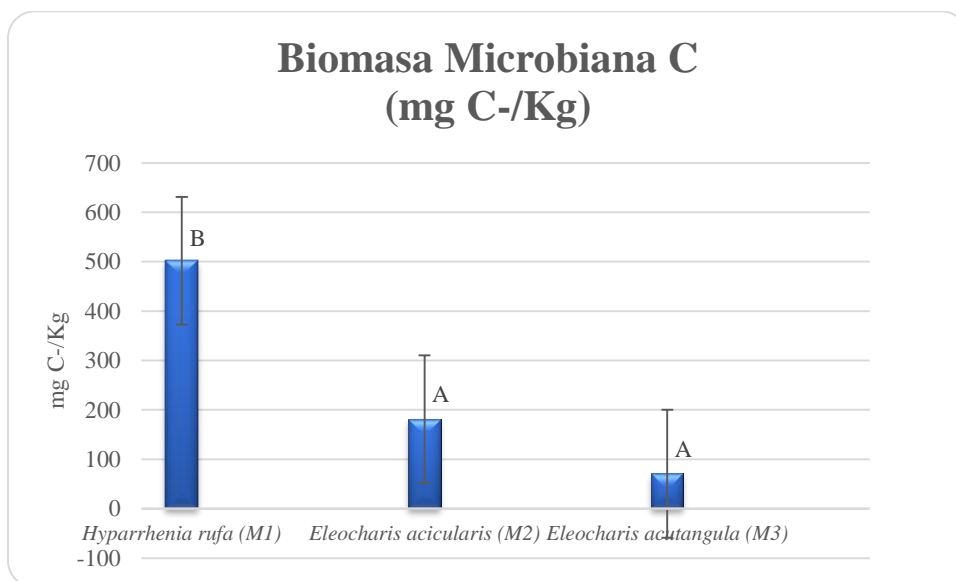


Figura 19. Biomasa Microbiana asociada al carbono de las muestras de suelo con (n=3). Valores con la misma letra entre tratamientos no difieren significativamente entre sí. (prueba de Tukey, (P<0.05)).

Los resultados de la biomasa microbiana asociada al carbono de la muestra correspondiente a la cobertura vegetal *Hyparrhenia rufa* (M1) en mg C kg⁻¹ arrojó un resultado (507 mg C kg⁻¹) semejante a el resultado (423 mg C kg⁻¹) reportado por Durango, Uribe, Henríquez, y Mata (2015) para un suelo de un bosque húmedo premontano con un rango de temperatura de 18 a 24°C y precipitación de 4000 a 8000 mm en las estribaciones de la cordillera de Talamanca en Grano de Oro, cantón Turrialba. Otro estudio realizado por (Paolini, 2018), obtienen resultados semejantes (472 mg C kg⁻¹) en un suelo orgánico proveniente de una finca agroforestal del estado de Mérida, Venezuela, a los reportados con los suelos de la muestra M1 (507 mg C kg⁻¹), las similitudes del resultado de la biomasa microbiana, pueden deberse a las coincidencias climáticas bajo las cuales se realizaron ambos estudios. En cuanto a los valores reportados para las muestras M2 y M3 no se

encontraron estudios con resultados semejantes o por lo menos que coincidieran en alguna de sus características fisicoquímicas, dado que son suelos con unas condiciones de humedad y materia orgánica superiores a los valores reportados en la literatura consultada.

Montenegro, (2008) referencia en su trabajo que los niveles de biomasa microbiana de un suelo se ven afectados por la cantidad y calidad de la materia orgánica del mismo; por otro lado, en el estudio realizado por Durango et al. (2015), en su estudio indica que los valores más altos de biomasa están relacionado con la acumulación de materia orgánica, incrementando la cantidad de biomasa y la proporción de esta biomasa en la materia orgánica del suelo, (Paolini, 2018) por su parte, define en su documento que los valores mayores de biomasa estuvieron asociados con un mayor contenido de materia orgánica. De acuerdo a lo anterior, se infiere que en la literatura consultada hay una relación directamente proporcional entre el contenido de materia orgánica y la biomasa microbiana, contradiciendo los resultados obtenidos en el presente estudio en donde se obtuvo una relación inversamente proporcional entre los valor de materia orgánica y los resultados de la biomasa; por ejemplo para la muestra M2 que representa el mayor porcentaje de Materia Orgánica con 31,4%, se obtuvo el menor valor de biomasa con 181 mg C kg^{-1} . Esta relación inversa se pudo evidenciar dado que, los valores de materia orgánica muy altos en el suelo, pueden presentar aluminosilicatos amorfos que absorben diferentes productos húmicos, convirtiendo la materia orgánica en un sustrato poco disponible para los microorganismos (La Torre, 2007), disminuyendo la acción por parte de los microorganismos y por consiguiente el contnenido de la biomasa microbiana en las muestras M2 y M3, considerando que, la biomasa microbiana (C_{mic}), cuantifica la cantidad global de microorganismos presentes en el suelo, es decir, el tamaño de la comunidad microbiana presente (Paolini, 2018). Adicionalmente, mientras más estable es la materia orgánica, la emisión de CO_2 y la O_2 actividad microbiana son menores ya que existe menos

material de fácil descomposición lo que impide la degradación por parte de los microorganismos (Guerrero, Quintero, Espinosa, Benedicto, & Sánchez, 2012).

Basado en la teoría que el contenido en carbono de biomasa microbiana refleja el tamaño de la población microbiana total del suelo (Chocano, Hernández, Melgares de Aguilar, Gonzáles, & García, 2008), uno de los factores que afectan la acción microbiana es la humedad en el suelo, que para efectos del presente trabajo se evidenció un mayor porcentaje de humedad en las muestras M2 y M3 siendo quienes presentaron menor porcentaje de biomasa microbiana, esto debido a que bajo condiciones desfavorables, los microorganismos requieren más energía para mantener la biomasa (Paolini, 2018). El agua del suelo controla la velocidad a la que los microorganismos consumen y respiran el carbono, puesto que, cuándo hay condiciones de suelo húmedo saturado o inundado, se limita la difusión de O_2 y reduce la actividad microbiana (Li, et al., 2018).

Numerosos estudios han revelado que el cambio climático, la invasión de plantas y la interferencia antropogénica pueden impactar fuertemente las características microbianas de los sedimentos (Li, et al., 2015).

6.3. Variables fisicoquímicas

6.3.1. Valor de pH

Los análisis estadísticos de los resultados obtenidos para las unidades de pH en las muestras, luego de la prueba de Tukey arrojaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre los tres sitios de muestreo, sin embargo, los valores obtenidos para las unidades de pH están entre un rango relativamente pequeño de pH (5,06 – 5,49 unidades de pH), siendo el valor más bajo para la muestra M1, y el valor más alto para la muestra M2, tal como se evidencia en el gráfico de la Figura 20. Estos valores de pH coinciden con los reportados en la Guía para la

Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo, 1999, que establece que para un suelo con pH entre 5,0 a 5,5 unidades de pH, son suelos correspondientes a suelos de pradera subhúmedos. (USDA, 1999).

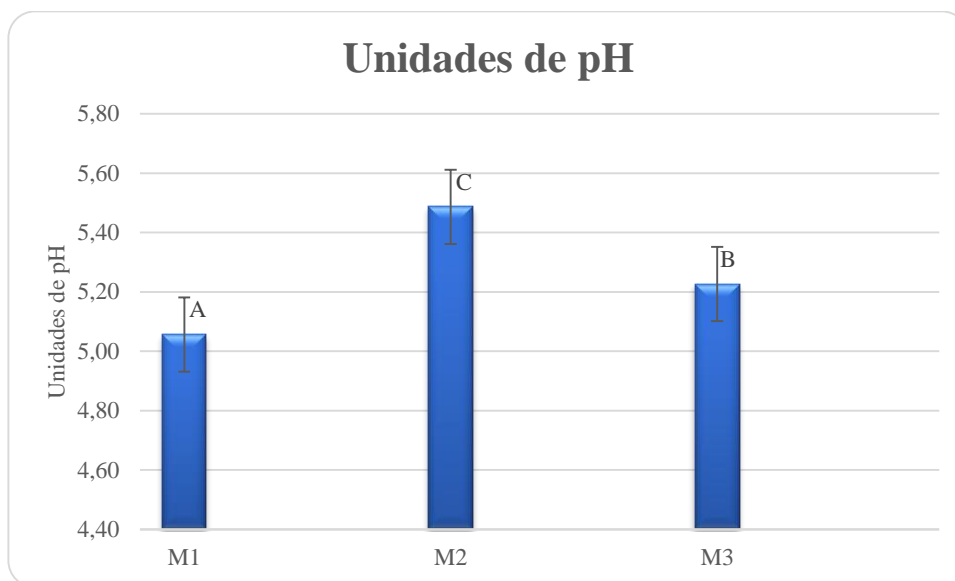


Figura 20. Valor de pH de las muestras de suelo bajo coberturas vegetales diferentes con (n=3). Valores con la misma letra entre tratamientos no difieren significativamente entre sí. (prueba de Tukey, (P<0.05)).

En el estudio realizado en la vereda El Manzano, Risaralda, Colombia, por Alzate y Campiño (2014), encontraron semejanzas en el resultado del valor de pH en los suelos diversificados de bosque a una profundidad de muestreo de 0-25 cm (la misma realizada en el presente estudio) con un valor de 4,9 unidades de pH, con los resultados de las muestras M1 con cobertura vegetal *Hyparrhenia rufa* 5,1 unidades de pH. Las similitudes en ambos estudios puede ser debida a las condiciones hidroclimáticas y a la ubicación geográfica de ambos estudios. Otro estudio realizado en suelos de un pantano y de bosque ubicados en la Reserva Natural Nacional de Nanwenghe, China por Li et al. (2018), encontraron en su estudio que el valor de pH del suelo fue ácido y significativamente más bajo en el pantano (en promedio 5.58).

6.3.2. Materia Orgánica

Los análisis estadísticos para los resultados obtenidos del contenido de materia orgánica, luego de la prueba de Tukey arrojaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$), en donde se puede apreciar un valor promedio menor en el porcentaje de materia orgánica en la muestra M1 (21,37 %MO) con cobertura vegetal *Hyparrhenia rufa*, seguido de la muestra M3 con un valor de 26,89%, en donde la cobertura vegetal predominante fue la especie *Eleocharis acutangula* (M3), finalmente la muestra M2 fue quien presentó el porcentaje de materia orgánica mayor para la cobertura vegetal con *Eleocharis acicularis* con un valor de 31,41% como se muestra en la gráfica de la figura 21. La diferencia en el porcentaje de materia orgánica puede deberse al contenido de humedad, dado que, las muestras M2 y M3 presentan valores de humedad superiores a la muestra M1 como se evidencio anteriormente y a que la descomposición de la materia orgánica en suelos pantanosos es extremadamente lenta (Li et al., 2018).

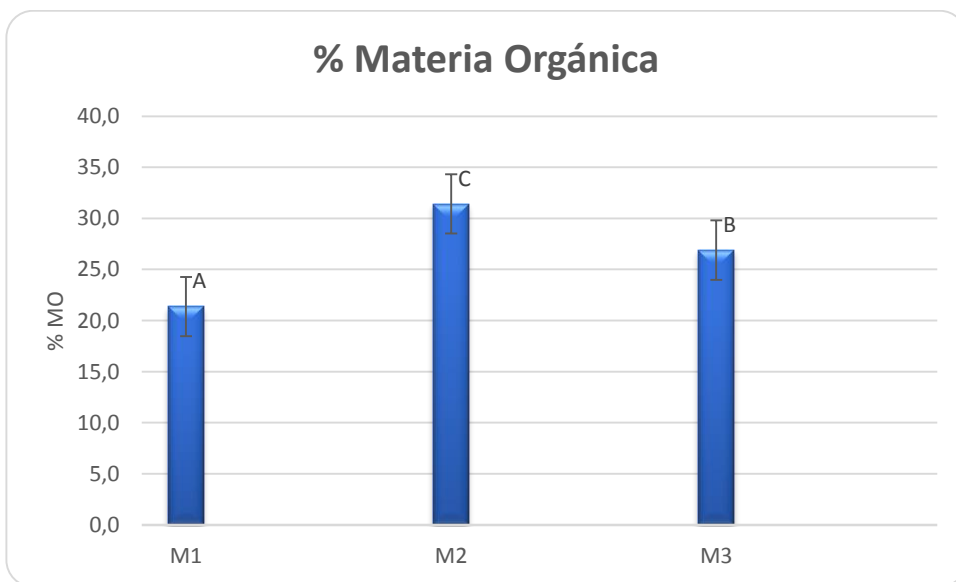


Figura 21. Porcentaje de Materia Orgánica en las muestras de suelo bajo coberturas vegetales diferentes con ($n=3$). Valores con la misma letra entre tratamientos no difieren significativamente entre sí. (prueba de Tukey, ($P < 0,05$)).

Hemes et al. (2019) referencia que en general, los suelos de los humedales son altamente orgánicos, por lo tanto, si se observan los resultados obtenidos en el presente estudio se puede confirmar que en efecto para los humedales tipo pantano arbustivos, con las características climáticas, de altura se obtuvieron valores con porcentajes de materia orgánica relativamente altos.

Estudios realizados por Suarez, Acurio, Chimbolema, y Aguirre (2016), en suelos de humedales altoandinos del Paque Nacional Cajas en Ecuador reportaron porcentajes de materia orgánica de: 27,3%, 29,2% y 39% para suelos de huendales conservados y alterados sin reposrte de cobertura vegetal, valores semejantes a los resultados obtenidos en el porcentaje de materia organica de las tres muestras de suelo analizadas en el presente estudio (21 % y 31%).

En el estudio realizado en la vereda El Manzano, Risaralda, Colombia, por Alzate y Campiño, 2014, se encontraron semejanzas en los resultados del porcentaje de materia orgánica de los suelos diversificados de bosque 21,2% MO, sin especificar la cobertura a una profundidad de muestreo de 0-25 cm (la misma realizada en el presente estudio), con los resultados de las muestras M1 con cobertura vegetal *Hyparrhenia rufa* 21,4% MO. Las similitudes en ambos estudios puede ser debida a las condiciones hidroclimáticas y a la ubicación geográfica de ambos estudios. Dado que, la influencia del relieve es determinante tanto en la cantidad como en la calidad de la Materia orgánica, en algunas ocasiones con la altitud se presentan cambios en las características del suelo, en la precipitación, la temperatura y el tipo de vegetación, influyendo también en la biomasa microbiana y la actividad microbiológica del suelo (Alzate & Campiño, 2014).

Hemes, et al., 2019, señala que en general, los suelos de los humedales son altamente orgánicos, como se evidencia en los resultados obtenidos en el presente estudio con valores por encima de 21% de contenido de materia orgánica; esto dado que la oxidación de la materia orgánica

es lenta bajo condiciones de anaerobias, lo que ocasiona una acumulación de materia orgánica en los sedimentos de los humedales (Hernández & Moreno, 2018).

6.4. Estimación cuantitativa de hongos, microorganismos heterotróficos y microorganismos celulolíticos

6.4.1. Hongos (Mohos y Levaduras)

Los análisis estadísticos para los resultados obtenidos del conteo de unidades formadoras de colonias de Mohos y Levaduras, luego de realizada la prueba de Tukey, no arrojaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre las muestras de los suelos bajo diferentes coberturas vegetales analizadas cómo se evidencia en la gráfica de la figura 22 sin embargo, se puede apreciar que para la muestra M1 con cobertura vegetal *Hyparrhenia rufa* se obtuvo una mayor presencia de mohos y levaduras con $1,5E+02$ UFC y valores semejantes para las muestras M2 y M3 bajo cobertura del género *Eleocharis* con un conteo de $4,6E+01$ UFC y $4,8E+01$ UFC respectivamente, no obstante, algunos representantes de la familia Cyperaceae (*eleocharis*) han sido reportados estableciendo relaciones simbióticas con hongos micorrícicos para prosperar con suelos degradados (Valois, 2016), a pesar de ello y según los resultados obtenidos para los hongos en las muestras M2 y M3 correspondientes a esta familia con el género *eleocharis*, se registraron valores menores que los arrojados en la M1 que corresponde a las familia Poaceae, infiriendo que el crecimiento de los hongos puede estar más ligado a la humedad que a la cobertura vegetal, dado que, las muestras M2 y M3 presentaron mayores porcentajes de humedad en relación con M1 y en condiciones aeróbicas, los microorganismos aeróbicos (como los hongos) son más abundantes (Bao, Zhao, Yang, Ren, & Wang, 2019). En el estudio realizado por Li, et al., (2018) evaluaron las comunidades de hongos y bacterias en el suelo en contrastes entre un pantano y bosque boreal,

encontraron que la actividad microbiana fúngica fue diferente en los pantanos que en los bosques, siendo menor en los pantanos, obteniendo también una relación inversamente proporcional entre la humedad del suelo y los hongos.

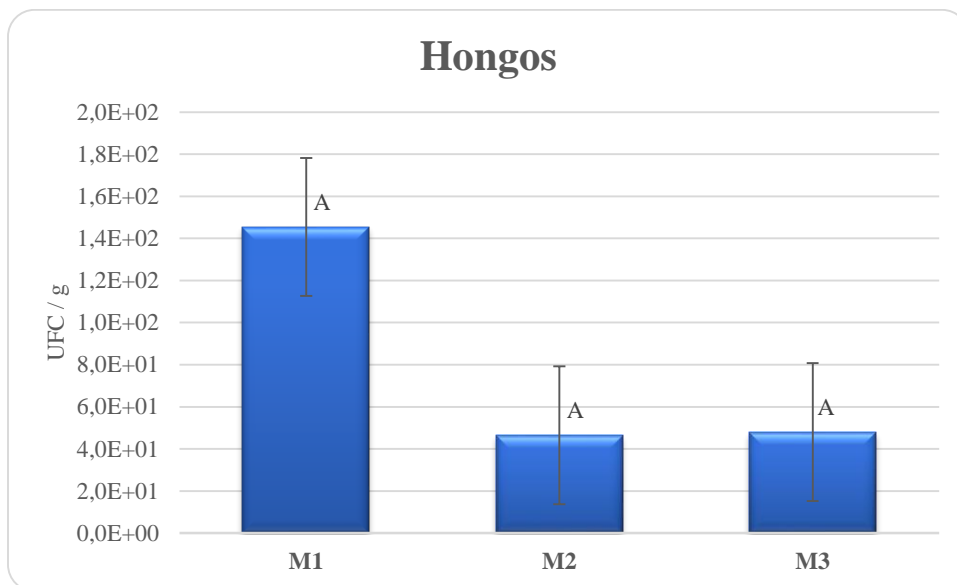


Figura 22. Unidades Formadoras de Colonia de Hongos (Mohos y Levaduras) presentes en las muestras de suelo bajo diferentes coberturas vegetales con $n=3$. Valores con la misma letra entre tratamientos no difieren significativamente entre sí. (prueba de Tukey, ($P>0.05$)).

6.4.2. Microorganismos Heterotróficos

En el análisis estadístico realizado para los microorganismos heterotróficos obtenido de la prueba de Tukey, se observó que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre los tres sitios de muestreo, tal como se muestra en la gráfica de la figura 23 sin embargo, se puede evidenciar un crecimiento levemente mayor en el suelo correspondiente al sitio de muestreo M1 y similares entre M2 y M3 con $6,5E+02$ UFC, $4,7E+02$ UFC y $5,9E+02$ UFC respectivamente. Estos valores pueden estar asociados a la relación inversamente proporcional con el contenido de humedad (ver anexo 4), por lo que, los procesos microbianos a menudo dependen

de factores ambientales, como la aireación, la humedad y la disponibilidad de nutrientes (Bao et al., 2019), por consiguiente el crecimiento limitado de los microorganismos heterótrofos en el presente estudio se pudo haber visto limitado por las condiciones de aireación, dadas las características tipo sedimento del suelo analizado y por su alto contenido de humedad con valores por encima del 70%, en el que, con el valor más bajo de humedad se evidencia un mayor crecimiento de microorganismos heterotróficos (M1).

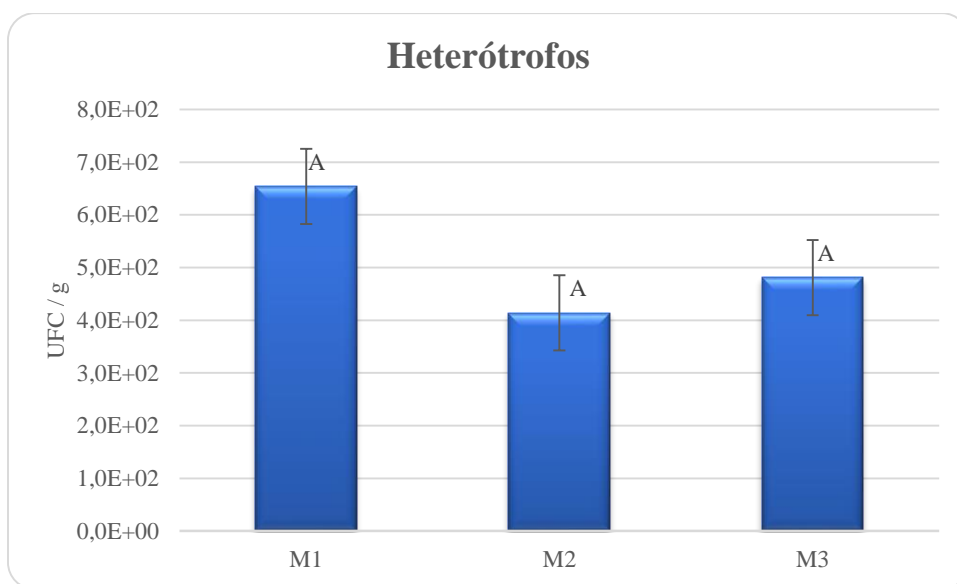


Figura 23. Unidades Formadoras de Colonia de Microorganismos Heterótrofos presentes en las muestras de suelo bajo diferentes coberturas vegetales con $n=3$. Valores con la misma letra entre tratamientos no difieren significativamente entre sí. (prueba de Tukey, ($P>0.05$)).

El estudio realizado por Alzate y Campiño, (2014), en suelos de bosques bajo condiciones medio ambientales y geográficas similares al presente estudio, obtuvieron conteos de unidades formadoras de colonias entre $8,0E+03$ y $1,2E+05$, valores superiores a los reportados para los suelos del humedal. A pesar que en el estudio realizado Alzate y Campiño, (2014), no se reporta valores de humedad, es posible que esta carga microbiana este dadad por las condiciones específicas del tipo de suelo, dado que los suelos estudiados aquí son provenientes de un humedal

tipo pantano arbustivo con condiciones de humedad mayores a las de un suelo tipo bosque proporcionando mejores condiciones de aireación del suelo.

6.4.3. Microorganismos Celulolíticos

En los análisis estadísticos realizados para los microorganismos celulolíticos arrojados por la prueba de Tukey, se observó que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre las muestras analizadas bajo diferentes coberturas vegetales, tal como se muestra en la gráfica de la figura 24 sin embargo, se puede evidenciar en los promedios de los resultados un conteo de unidades formadoras de colonia superiores en la muestra M1 con $5,2E+02$ UFC, y valores de $1,5E+02$ UFC y $4,0E+02$ UFC respectivamente para las muestras M2 y M3. Estos valores se deban posiblemente al porcentaje de materia orgánica presente en el suelo, dado que se presenta una correlación negativa fuerte entre este parámetro y los celulolíticos (Ver anexo 4).

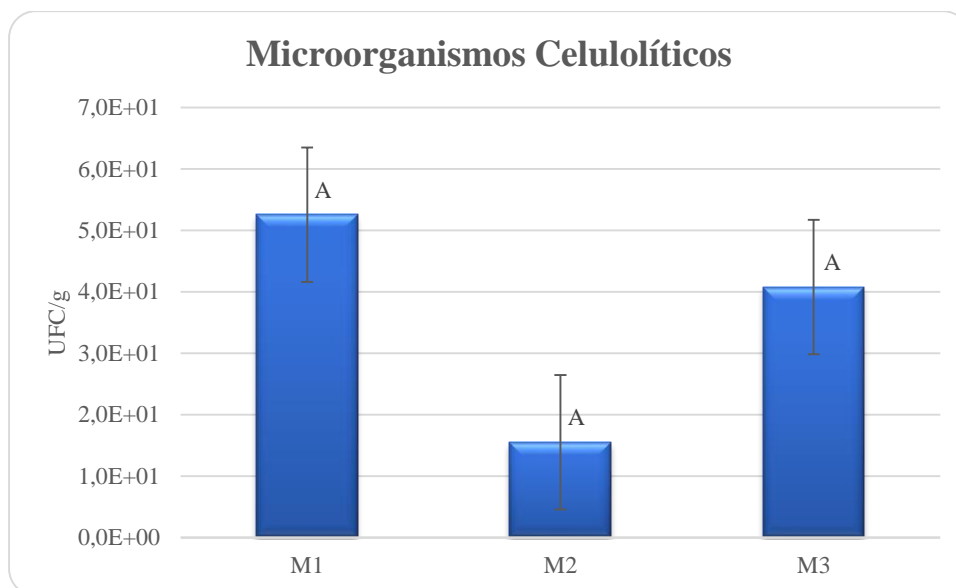


Figura 24. Unidades Formadoras de Colonia de Microorganismos Celulolíticos presentes en las muestras de suelo bajo diferentes coberturas vegetales con $n=3$. Valores con la misma letra entre tratamientos no difieren significativamente entre sí. (prueba de Tukey, $P>0.05$).

De la evaluación de los microorganismos presentes en los tres sitios de muestreo en los suelos estudiados, los microorganismos celulolíticos fueron los que presentaron un menor presencia con respecto a los hongos y bacterias, esto debido posiblemente a que las poblaciones de microorganismos en estos suelos presentaron diferentes capacidades de degradar formas complejas de carbono (Paz & Wong, 2015), se puede inferir que no hay unas condiciones adecuadas para la degradación de la materia orgánica por parte de los microorganismos celulolíticos. En el estudio realizado por Paz y Wong, (2015), en suelos de sucesión ecológica localizado dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Sierra de Álamos-Rio Cuchuquí al sur del estado de Sonora, también encontraron un potencial de degradación de materia orgánica, sin embargo, en relación a la población microbiana total en un sitio de muestreo no se contó con una numerosa cantidad de microorganismos celulolíticos. La degradación del suelo está controlada principalmente por variables abióticas como la disponibilidad de nutrientes, la densidad del suelo, la temperatura, la humedad y el pH, excluyendo la importancia de las comunidades microbianas. Existe evidencia de que los hongos y las bacterias tienen diferentes actividades metabólicas utilizando de varias maneras la materia orgánica (Peña C, et al., 2015).

En el estudio realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1993), donde se evaluó la distribución de las poblaciones de hongos, actinomicetos y bacterias, bajo diferentes usos de la tierra, concluyeron que los suelos bajo bosque se presentan índices altos de diversidad y de riqueza biológica. Sin embargo, numerosos estudios han revelado que hay factores como el cambio climático, la invasión de plantas y la interferencia antropogénica que pueden impactar fuertemente las características microbianas de los sedimentos, y la composición de la comunidad microbiana también puede cambiar, como también las propiedades fisicoquímicas de los sedimentos y la configuración hidrológica afectan el ciclo microbiano de C y N (Li et al., 2015).

En el estudio realizado por Li et al., (2018), obtuvieron que la abundancia microbiana, la diversidad y las actividades fueron más bajas en el pantano que en las tierras altas, lo que sugiere que las funciones de los ecosistemas mediadas por las comunidades microbianas del suelo. Para efectos del presente trabajo en donde fue evaluado solamente la abundancia microbiana se observó que según los resultados obtenidos se evidencia un crecimiento mayor de microorganismos heterótrofos, seguido por hongos y finalmente los celulolíticos.

En el estudio de las interacciones entre grupos funcionales hecho por Matsumoto, et al., (2004), se observó que existían correlaciones positivas entre la colonización hongos y comunidades microbianas celulolíticos en la rizosfera, como se logró evidenciar en el presente estudio con una correlación semejante entre ambos resultados (Ver anexo 4).

Los resultados obtenidos en el estudio realizado por Peña, et al., (2015) indicaron que los suelos conservados almacenan C principalmente como biomasa fúngica, mientras que los suelos degradados almacenan C como biomasa bacteriana. Estos resultados podrían explicarse por cambios en el contenido, calidad y propiedades de la materia orgánica, así como cambios en los ciclos de mineralización y humidificación del suelo que se reflejan en una reducción de la capacidad del suelo para mantener su fertilidad. Con esto se puede decir que el suelo presente el humedal de la quebrada Dalí, son suelos degradados.

6.5. Análisis de Correlaciones

Los análisis estadísticos de las correlaciones de los resultados se analizaron por Anova, por medio de la prueba de correlaciones de Pearson (Anexo 4), en los que se encontró para las tres muestras de suelo analizados en el presente estudio que no existen relaciones estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre la respiración del suelo y los parámetros evaluados, sin embargo, se

puede observar una correlación positiva moderada entre los resultados de la respiración del suelo y la biomasa microbiana asociada al carbono como se muestra en los resultados de la prueba de Pearson en el anexo 4. En los resultados obtenidos en el presente estudio se observa un comportamiento similar en ambas variables, siendo menores los valores en la muestra M3 y una mayor respuesta en la muestra M1 respectivamente. Esta relación fue hallada en el estudio realizado por Wenfang, Wenping, Lilun, Minna, y Fenguo (2019), quienes observaron que la mayor respuesta de la Biomasa microbiana de carbono en la capa superior del suelo fue probablemente causada por una mayor actividad microbiana en el suelo, dado que la Biomasa microbiana asociada al carbono es una importante fracción de carbono orgánico del suelo, que puede verse influida por actividades microbianas (Huo et al., 2018).

Un estudio llevado a cabo en un humedal de un estuario en Yangtze, ubicado en el centro-este de China, con diferentes condiciones ambientales encontraron una correlación positiva entre la composición de la comunidad microbiana y la actividad microbiana (Li et al., 2015). La respiración heterotrófica contribuye a la descomposición, junto a otros procesos como la humificación y la fragmentación del detritus. Los microorganismos respiran continuamente y la tasa de respiración es un índice confiable de la tasa de crecimiento. Los factores que afectan el crecimiento también influyen en la respiración en el mismo grado (Guerrero, et al., 2012).

En cuanto al análisis estadístico para las variables respiración del suelo y la humedad se encontró una correlación negativa moderada (Anexo 4), coincidiendo con los estudios previos realizados en suelos de un humedal costero en China, en donde encontraron que la respiración del suelo se correlacionó negativamente de manera significativa con la humedad del suelo (Guangxuan et al., 2018). Ahora bien, en el estudio llevado a cabo en un humedal de un estuario en Yangtze, ubicado en el centro-este de China, con diferentes condiciones ambientales encontraron una

correlación positiva de la composición de la comunidad microbiana y la actividad microbiana con el carbono orgánico (Li et al., 2015).

En los estudios realizados por Alzate y Campiño (2014), en el cual realizaron mediciones de la respiración del suelo, microorganismos heterótrofos y hongos, en suelos de bosques obtuvieron que, para esos suelos, en donde se presentaba mayor respiración existía una relación directamente proporcional con los resultados de los conteos de hongos y bacterias; por lo tanto, determinaron en su estudio que a mayor respiración existen mayor cantidad de microorganismos en el suelo.

Es importante tener en cuenta, que en climas cálidos las tasas de respiración son mayores y varían con el pH del suelo, contenido de humedad, suplemento de O₂ y disponibilidad de N, siendo mayores cerca de la superficie del suelo, debido a altas concentraciones de materia orgánica y a la disponibilidad de oxígeno. (Hinojosa et al., 2013). Múltiples reacciones bioquímicas que utilizan carbono se llevan a cabo en los humedales debido a la gran cantidad de materia orgánica, lo que promueve la actividad microbiana, uno de los procesos microbianos de transformación de carbono es la respiración (CO₂ y CH₄) (Hernández & Moreno, 2018). Wenfang et al. (2019) en su estudio en suelos de la meseta tibetana de Qinghai, China encontraron que cuando hay una evidente reducción de la actividad microbiana, disminuye la respiración microbiana. La degradación de la materia orgánica del suelo es un proceso inherente a todos los microorganismos heterotróficos y generalmente su tasa o velocidad de descomposición indica el nivel de la actividad microbiana de un suelo (Paolini, 2018). En cuanto a los microorganismos celulolíticos se evidencia una correlación negativa moderada con el valor de la materia orgánica, este hallazgo coincide con lo reportado por Paz y Wong (2015).

Con los resultados obtenidos de la respiración del suelo en el presente estudio, se puede evidenciar que existe una correlación positiva moderada entre la respiración del suelo y los hongos y una correlación positiva muy baja entre la respiración y los microorganismos heterótrofos y celulolíticos (Anexo 4), evidenciando que para los suelos del humedal estudiados quienes tuvieron mayor representación fueron los hongos. Peña et al. (2015), señala en su estudio que la capacidad de fijación de carbono del suelo se relaciona con los cambios en la composición microbiana del suelo, donde en los terrenos conservados el carbono es almacenado como biomasa fúngica, mientras que los suelos degradados almacenan carbono como biomasa bacteriana. Algunos investigadores han sugerido que la BMC / BMN refleja la proporción de la cantidad de hongos con respecto a la de las bacterias, de modo que una mayor BMC / BMN refleja muchos más hongos (Huo et al., 2018). En el estudio realizado por Li et al. (2018) encontraron que las comunidades de bacterias y hongos mostraron diferencias notables entre los sitios de pantanos y tierras altas, encontrando que las diferencias de las composiciones de la comunidad bacteriana y fúngica entre los dos sitios se debieron principalmente al contenido de humedad del suelo. El pH del suelo también afecta la actividad de microorganismos beneficiosos, lo cual afecta a su vez la disponibilidad de nutrientes. En general, los hongos cumplen sus funciones en un rango amplio de pH, pero las bacterias y los actinomicetos se desempeñan mejor a pH intermedios o algo elevados (USDA, 1999). Estudios previos han demostrado que la composición de la comunidad microbiana en el bosque boreal se determinó principalmente por el pH del suelo, y los hongos y bacterias mostraron un predominio en la comunidad microbiana total a un pH bajo y alto del suelo, respectivamente (Li et al., 2018).

La biomasa microbiana tuvo una correlación estadísticamente significativa negativa alta con el porcentaje de humedad y el porcentaje de materia orgánica. Wenfang et al. (2019),

encontraron una relación inversa entre el contenido de Biomasa microbiana y carbono orgánico del suelo, siendo mayor el contenido de MBC en sitios donde se presentó contenidos bajos de Carbono orgánico (SOC).

6. Conclusiones

Se estimó cuantitativamente la actividad microbiana por la técnica de respiración basal en tres suelos con diferente cobertura vegetal del complejo de humedales de la quebrada Dalí, obteniendo resultados para la muestra M1 con cobertura vegetal *Hyparrhenia rufa* un valor promedio con n=3 de 0,39 mg CO₂ /g; para la muestra M2 con cobertura vegetal *Eleocharis acicularis* un valor promedio con n=3 de 0,30 mg CO₂ /g y para la muestra M3 con cobertura vegetal *Eleocharis acutangula* 0,22 mg CO₂ /g.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de las correlaciones entre la respiración y las demás variables analizadas se puede inferir que la respiración microbiana en los sitios de estudio depende de múltiples factores como las condiciones edáficas del sistema, biomasa microbiana, porcentaje de humedad, el porcentaje de materia orgánica y la presencia de microorganismos.

Las condiciones de inundación de los suelos estudiados del humedal tipo pantano arbustivo, con porcentajes de humedad por encima del 70% pudieron haber limitado la actividad microbiana, como también el contenido de biomasa microbiana y favoreciendo el porcentaje de materia orgánica.

Se estimó la biomasa microbiana asociada al carbono por la técnica de respiración inducida por sustrato en tres suelos con diferente cobertura vegetal del complejo de humedales de la quebrada Dalí, obteniendo resultados para la muestra M1 con cobertura vegetal *Hyparrhenia rufa* un valor promedio con n=3 de 502 mg C /Kg; para la muestra M2 con cobertura vegetal *Eleocharis*

acicularis un valor promedio con n=3 de 181 mg C /Kg y para la muestra M3 con cobertura vegetal *Eleocharis acutangula* 71 mg C /Kg.

Se encontró que en los tres sitios de muestreo en suelos del humedal se presentaron valores de pH en el rango de muy fuertemente ácido.

Los porcentajes de materia orgánica para los tres sitios de muestreo del humedal estudiado con especies vegetales diferentes en cada sitio, en las condiciones bajo las cuales fue llevado el ensayo el día de muestreo son porcentajes altos. Por lo anterior, se puede decir que la acumulación de materia orgánica en los suelos del humedal de la quebrada Dalí, son suelos que presentan condiciones de inundación permanente, por lo tanto, presentan una baja tasa de descomposición de materia orgánica.

Con los resultados obtenidos de la respiración del suelo en el presente estudio, se pudo evidenciar una correlación positiva moderada entre la respiración del suelo y los hongos y una correlación positiva muy baja entre la respiración y los microorganismos heterótrofos y celulolíticos, evidenciando que para los suelos del humedal los hongos tuvieron menor representación con la respiración.

Para este estudio se observó que el conteo de microorganismos celulolíticos es inverso al contenido de materia orgánica del suelo, infiriendo este comportamiento a que la celulasas se adicionan al material particulado de la materia orgánica disminuyendo su crecimiento.

7. Recomendaciones

Realizar análisis de densidad aparente a los suelos del humedal, con el objetivo de determinar el almacenamiento de carbono por unidad de área.

Dado que la biomasa microbiana es mucho más sensible al cambio que el C total, es importante relacionar el C microbiano: C orgánico del suelo para detectar cambios tempranos en la dinámica de la materia orgánica.

Calcular el cociente de eficiencia metabólica para evaluar la eficiencia de los microorganismos desde el punto de vista energético y relacionar la cantidad y la actividad de los microorganismos del suelo.

Los humedales tienen un potencial importante de secuestro de carbono, pero el drenado, quemas y pastoreo provocan la oxidación del carbono almacenado en ellos y la liberación de CO₂. Estos ecosistemas pueden contribuir a la mitigación de los gases de efecto invernadero, pero es necesario incrementar las investigaciones acerca de la dinámica del carbono, desde que es capturado en la vegetación hasta que pasa a ser parte del suelo.

Los microorganismos desempeñan funciones esenciales en los procesos de ciclo de nutrientes en los ecosistemas. Por lo tanto, es necesario estudiar cómo afectan las condiciones ambientales distintivas a las comunidades microbianas.

8. Bibliografía

- Acuario Adictos*. (s.f.). Recuperado el 26 de Agosto de 2019, de <https://acuarioadictos.com/eleocharis-acicularis/>
- Alvarado, L., Otálora, E., del Castillo, D., Linares, C., Martínez, P., & Malca, G. A. (Noviembre de 2006). *Servicios Ambientales de Almacenamiento y Secuestro de Carbono del Ecosistema Aguajal en la Reserva Nacional PACAYA Samiria*. (I. d. Peruana, Ed.) Obtenido de Repositorio Institucional del IIAP: <http://repositorio.iiap.org.pe/handle/IIAP/228>
- Álvares, S. (2005). La descomposición de materia orgánica en humedales: la importancia del componente microbiano. *Revista Ecosistemas*, 2, 17-29. Obtenido de <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=118>
- Alvis, T., & Villasante, J. F. (2018). *Almacenamiento de Carbono en los Humedales Altoandinos del Centro Poblado Chalhuanca, Caylloma – Arequipa*. Obtenido de Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8214>
- Alzate, J. D., & Campiño, D. (2014). *Repositorio UTP*. Obtenido de ACTIVIDAD MICROBIANA DE SUELOS CON MANEJO ORGÁNICO Y CONVENCIONAL: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/4317/631417A478.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ambiente, M. d. (Julio de 2002). *Política Nacional para Humedales Interiores de Colombia*. Bogotá D.C, Colombia.
- Balvanera, P., Colter, H., Aburto Oropeza, O., Aguilar Contreras, A., Aguilera Peña, M., Aluja, M., . . . et.al. (2009). Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos. *Conaibo*, 2, 185-245.
- Bao, T., Zhao, Y., Yang, X., Ren, W., & Wang, S. (2019). Effects of disturbance on soil microbial abundance in biological soil crusts on the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 163, 59-67. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.01.003>.
- Barbier, E. B., Acreman, M., & Knowler, D. (1997). *Valoración económica de los humedales – Guía para decisores y planificadores*. Gland, Suiza: Oficina de la convención Ramsar.
- Bergkamp, G., & Orlando, B. (Octubre de 1999). *Ramsar*. Obtenido de Los Humedales y el cambio climático: <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/dn1999-9papers.pdf>

- Bermúdez, V. M. (2016). Evaluación de la estabilidad ecohidrológica y análisis de emergencia para la Quebrada Dalí y su complejo de humedales, Vereda El Cedral, Santa Rosa de Cabal, Risaralda. *Maestría en Ecotecnología*. Pereira, Colombia.
- Borja, A., Chanona, M., & López, S. (junio de 2017). "Programa de restauración de una superficie de 5 hectáreas con presencia de pasto jaragua en los márgenes del humedal del Parque Nacional Cañón del Sumidero. Primer informe parcial dentro del proyecto GEF 089333" (A. M. Forestales, Productor) Obtenido de <https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/Invasoras/gef/pdf/2.2-6-plan-trabajo-control-pasto-canon-sumidero.pdf>
- Burbano Orjuela, H. (Febrero de 2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 34(1), 82-96. doi:<http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.85>
- CARDER, C. A. (2011). *Plan General de Ordenación Forestal del Departamento de Risaralda*. Pereira.
- Carrillo P., I. (1985). *Manual de laboratorio de suelos*. Obtenido de CENICAFE: <http://hdl.handle.net/10778/803>
- Cerón, L. E., & Ramírez, E. (2011). Actividad Microbiana en Suelos y Sedimentos en el Sistema Córdoba Juan Amarillo, Bogota D.C. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 349-361. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082011000300008&lng=en&nrm=iso
- Cerón, L., & Melgarejo, L. M. (enero de 2005). Enzimas del Suelo: indicadores de salud y calidad. *Acta Biológica Colombiana*, 10(1), 5-18. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/27110/27385>
- Chimmer, R. A. (2004). Soil Respiration Rates of Tropical Peatlands in Micronesia and Hawaii. *Springer Netherlands*, 24(1), 51-56. doi:[https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2004\)024\[0051:SRROTP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2004)024[0051:SRROTP]2.0.CO;2)
- Chocano, C., Hernández, M., Melgares de Aguilar, J., Gonzáles, D., & García, C. (2008). La Actividad Microbiana Como Indicador de Calidad de Suelo en Cultivos de Ciruelo Ecológico. *Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura*. CEBAS. Obtenido de https://www.agroecologia.net/recursos/publicaciones/publicaciones-online/2009/eventos-seae/cds/congresos/actas-bullas/seae_bullas/verd/posters/9%20P.%20FER/1.pdf
- Cueva, A., Yépez, E. A., Garatuza, J., Watts, C. J., & Rodríguez, J. C. (2012). Diseño y Uso de un Sistema Portátil para Medir la Respiración de Suelo en Ecosistemas. *Terra*

- Latinoamericana*, 30(4), 327-336. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57325814004>
- Durango, W., Uribe, L., Henríquez, C., & Mata, R. (2015). Respiración, Biomasa Microbiana y Actividad Fosfatasa del Suelo en dos Grandes Ecosistemas y un Bosque en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*(39), 37-46. Obtenido de www.mag.go.cr/revagr/index.html
- FAO. (2002). *Captura de Carbono en Suelos para un Mejor Manejo de la Tierra*. Roma: ISSN 1020-430-X.
- FAO. (2017). *Mapa de Carbono Orgánico del Suelo*. Recuperado el 01 de Mayo de 2019, de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <http://www.fao.org/3/i8195es/I8195ES.pdf>
- Forest Carbon Partnership Facility*. (s.f.). Obtenido de Estimación de costos de oportunidad de REDD+. Manual de capacitación.: https://www.forestcarbonpartnership.org/sites/fcp/files/Documents/PDF/July2012/05_capitulo%2005%20Medicion%20del%20carbono%20de%20los%20usos%20del%20suelo.pdf
- Froni, L. (2005). *Microbiología Básica, ambiental y agrícola*. Uruguay.
- Gil, A., & Bove, C. (2007). *Eleocharis R.Br. (Cyperaceae) no Estado do Rio de Janeiro, Brasil*. *Biota Neotropica*, 7(1). Obtenido de <http://www.biotaneotropica.org.br/v7n1/pt/abstract?taxonomic-review+bn00507012007>
- González, N. L., & Álvarez, L. S. (2009). *Respiración de suelo por sustrato inducido en un bosque siempre verde montano bajo y en una cronosecuencia de pastizales en la provincia de Zamora Chinchipe*. Obtenido de Repositorio Institucional UTPL: <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/2200>
- Guangxuan, H., Baoyu, S., Xiaojing, C., Qinghui, X., Weimin, S., & Jianyang, X. (2018). Precipitation events reduce soil respiration in a coastal wetland based on four-year continuous field measurements. *Agricultura and Forest Meteorology*, 256-257, 293-303. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.03.018>.
- Guerrero, P. L., Quintero, R., Espinosa, V., Benedicto, G., & Sánchez, M. (2012). Respiración de CO2 Como Indicador de la Actividad Microbiana en Abonos Orgánicos de *Lupinus*. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 355-362. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57325814007>
- Hemes, K., Chamberlain, S. D., Eichelmann, E., Anthony, T., Valach, A., Kasak, K., . . . Baldocchi, D. D. (15 de April de 2019). Assessing the carbon and climate benefit of

- restoring degraded agricultural peat soils to managed wetlands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268, 202-214. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.017>
- Hergoualc'h, K., Hendry, D., Murdiyarso, D., & Verchot, L. V. (18 de July de 2017). Total and heterotrophic soil respiration in a swamp forest and oil palm plantations on peat in Central Kalimantan, Indonesia. (S. I. Publishing, Ed.) *Biogeochemistry*, 135(ISSN 0168-2563), 203-220. doi:10.1007/s10533-017-0363-4
- Hernández, M. E. (2010). Suelos de Humedales Como Cumideros de Carbono y Fuentes de Metano. *Terra Latinoamericana*, 28(2), 139-147. Recuperado el 20 de Octubre de 2018, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792010000200005&lng=es&tlng=es.
- Hernández, M. E., & Moreno, P. (Octubre de 2018). Almacenes y Flujos de Carbono en Humedales de Agua Dulce en México. *Madera y Bosques*, 24. doi:<https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401881>
- Hernández, R., Victorino, I., Castro, L., & Eraso, L. (2014). *Estado del conocimiento de los humedales continentales en Colombia*. Informe Final, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá. Obtenido de <http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/9510/13-13-014-161PS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hernández, S. (2015). *Indicadores de calidad ambiental de humedales*. Recuperado el Septiembre de 2019, de Universidad Católica de Manizales: <http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/1136/Santiago%20Hernandez%20Henao.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hinostroza, A., Malca, J., & Suarez, L. (2013). Dinámica de la biomasa microbiana y su relación con la respiración y el nitrógeno del suelo en tierras agrícolas en el valle del Mantaro. *Revistas Científicas Alas Peruanas*. doi:<http://dx.doi.org/10.21503/CienciayDesarrollo.2013.v16i1.02>
- Huo, L., Zou, Y., Lyu, X., Zhang, Z., Wang, X., & An, Y. (2018). Effect of Wetland Reclamation on Soil Organic Carbon Stability in Peat mire Soil Around Xingkai Lake in Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 28(2), 325-336. doi:<https://doi.org/10.1007/s11769-018-0939-5>
- IGAC. (1993). *Aspectos ambientales para el ordenamiento territorial del occidente del departamento del*. Bogotá: INPA-IGAC.
- InfoStat. (2018). *InfoStat Software Estadístico*. Obtenido de <https://www.infostat.com.ar/index.php?mod=page&id=15>

- Kandus, P., Quintana, R., Minotti, P., Oddi, J., Baigún, C., Gonzales, G., & Ceballos, D. (2015). Ecosistemas de humedal y una perspectiva hidromorfológica como marco para la valoración ecológica de sus bienes y servicios. En P. Littera, E. Jobbágy, & J. Paruelo, *Valoración de servicios ecosistémicos: conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial* (Vol. 24, págs. 265-290). Buenos Aires, Argentina. Recuperado el 26 de Septiembre de 2019, de https://ced.agro.uba.ar/ubatic/sites/default/files/files/libro_serv_ecosist/pdf/Capitulo_11.pdf
- Krebs, L. (2003). *Respiración del suelo como herramienta para evaluar calidad de fondos en acuicultura. i. desarrollo de un protocolo estándar para medir dióxido de Carbono*. Obtenido de Repositorio Dspace: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/8666>
- La Torre, N. (2007). *Evaluación de Medios de Cultivo Altos y Bajos en Nutrientes para la Recuperación de Heterótrofos Edáficos en la Ecorregión Cafetera de los Andes*. Pontificia Universidad Javeriana, Cundinamarca, Bogotá D.C. Recuperado el 26 de Febrero de 2019, de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/8217>
- Laboratorio Microbiología Industrial*. (2017). Recuperado el 21 de 08 de 2019, de MAG: <http://www.laboratoriomag.com.ar/sitio2/index.php/tecnicas-recomendadas/tecnica-de-recuento-por-dilucion>
- Lasso, C. A., Gutierrez, F. d., & Morales-B, D. (2014). *X Humedales Interiores de Colombia: Identificación, caracterización y establecimiento de límites según criterios biológicos y ecológicos*. (I. d. (IAyH), Ed.) Bogotá D.C, Colombia: Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia.
- Latorre, N. E. (2007). *Evaluación de medios de cultivo altos y bajos en nutrientes para la recuperación de Heterótrofos edáficos en la ecorregión cafetera de los Andes*. (P. U. Javeriana, Ed.) Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/8217>: <http://hdl.handle.net/10554/8217>
- Lessard, R., Gignac, D., & Rochette, P. (2005). *El Ciclo del Carbono: Midiendo el flujo del CO2 del Suelo*. Obtenido de <https://greenteacher.com/article%20files/elciclodelcarbono.pdf>
- Li, J., Hu, H.-W., Cai, Z.-J., Lei, Y.-R., Zhang, M.-Y., Li, W., & Wang, J.-T. (2018). Contrasting Soil Bacterial and Fungal Communities between the Swamp and Upland in the Boreal Forest and their Biogeographic Distribution Patterns. *Wetlands and Climate Change*, 39, 441. doi:<https://doi.org/10.1007/s13157-018-1086-6>
- Li, X., Hou, L., Liu, M., Lin, X., Li, Y., & Li, S. (2015). Primary effects of extracellular enzyme activity and microbial community on carbon and nitrogen mineralization in estuarine and

- tidal wetlands. *Appl Microbiol Biotechnol* . Springer Berlin Heidelberg, 99, 2895-2909. doi:10.1007/s00253-014-6187-4
- Marín, J. L., Hernandez, M. E., & Moreno, P. (2011). Secuestro de Carbono en Suelos Humedales Costeros de Agua Dulce en Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(3), 365-372. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93920942013>
- Matsumoto, L. S., Martines, A. M., Avanzi, M. A., Albino, U. B., Brasil, C. B., Saridakis, D. P., . . . Andrade, G. (2004). Interactions among functional groups in the cycling of, carbon, nitrogen and phosphorus in the rhizosphere of three successional species of tropical woody trees. *El Sevier*, 57-65. doi:10.1016/j.apsoil.2004.06.008
- Montenegro, S. P. (2008). *Influencia de la Aplicación de Vinaza Sobre la Presencia, Actividad y Biomasa Microbiana del Sueloen el Cultivo de Maíz Dulce (ZEa Mays)*. Universidad Nacional de Colombia, Valle, Palmira.
- Mora, J. R. (2006). La Actividad Microbiana: Un Indicador Integral de la Calidad del Suelo. *Luna Azul. Universidad de Caldas*. Obtenido de http://lunazul.ucaldas.edu.co/index2.php?option=com_content&task=view&i
- Mosquera, S. L., Nieto, O., Tapia, C., & Delegados de las comunidades étnicas y locales. (2015). *Humedales para la gente: visiones desde lo local*. Bogotá D.C: Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humbolt.
- Naranjo , L., Andrade, G., & Ponce de León, E. (Mayo de 1999). *Humedales interiores de Colombia: Bases técnicas para su conservación y uso sostenible*. (IAVH, Ed.) Recuperado el 2018, de Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt: <http://www.humboldt.org.co/es/i2d/item/172-humedales-interiores-de-colombia-bases-tecnicas-para-su-conservacion-y-uso-sostenible>
- Ochoa, R. P., & Burneo, J. (Septiembre de 2015). *Comparación de Dos Métodos para Determinar el Carbono de la Biomasa Microbiana en Suelos Provenientes del Sur de Ecuador*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2018, de Repositorio Institucional UTPL: <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/13350>
- OMS. (2011). *Guía de prácticas hidrológicas*. (O.-N. 168, Ed.) Obtenido de http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/publications/guide/spanish/168_Vol_I_es.pdf
- Orellana, G., Sandoval, M., Linares, G., García, N. E., & Tamariz, J. (2012). Descripción de la dinámica de carbono en suelos forestales mediante un modelo de reservorio. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 3(1), 123-135.

- Ortega, M., Martínez, F., & Padilla, F. (2003). Aspectos Metodológicos para Evaluar la Calidad Ambiental de los Humedales. *Dialnet*, 125-137. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2244840>
- Paolini, J. E. (2018). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes Venezolanos. *Terra Latinoamericana*, 36(1), 13-22. doi:<https://dx.doi.org/10.28940/terra.v36i1.257>
- Paz, F., & Wong, J. (2015). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014*. (U. M. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Ed.) Texcoco, Estado de México, México: Serie Síntesis Nacionales. Obtenido de <http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000057582>
- Peña, C. P., Mendoza, E., Rodríguez, C., Cardona, G., Betancurt, B., & Grazón, M. (2015). Capacidad de Fijación de C de los Suelos Amazónicos y su Relación con su Estado de Degradación. *Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 12(2), E47-E53. doi:<http://dx.doi.org/10.14508/reia.2014.11.E2.47-53>
- Peña, C., Mendoza, E., Rodríguez, C., Cardona, G., Betancurt, B., & Garzón, M. (Junio de 2015). Carbon Fixing Capacity of Amazonian Soils in Relation to its DEgradation Conditions. *EIA*, 12(2), E47-E53. doi:<http://dx.doi.org/10.14508/reia.2014.11.E2.47-53>
- Perez, L. Y., & Chacón, M. (2008). *Evaluación Microbiológica de la Calidad del Suelo en Cultivos de Tabaco (Nicotiana tabacum) en los Municipios de Girón y Piedecuesta (santander) utilizado como indicadores lo grupos funcionales de microorganismos*. (U. I. Santander, Ed.) Recuperado el Octubre de 2018
- Poletta, G. L. (2011). *Monitoreo de Daño Inducido por Plaguicidas en Caimán Latiostris (Yacaróvero) Como Organismo Centineal de los Humedales de Argentina*. Obtenido de Biblioteca Digital FCEN-UBA: <https://digital.bl.fcen.uba.ar/gsd1-282/cgi-bin/library.cgi?a=q&r=1&hs=1&e=p-00000-00---off-0tesis--00-2----0-10-0---0---0direct-10---4-----0-11--10-es-50---20-about---00-3-1-00-0-0-01-0-0utfZz-8-00&fqf=TE&t=0&sf=&q=Monitoreo+de+Da%C3%B1o+Inducido+por+P>
- Quintín, C., Montoya, J., & Paz, I. (2015). Liberación de CO₂ a la atmósfera por actividad rizosférica de diferentes cultivos en zona cafetera del departamento del Cauca. *Ciencias Agrícolas*, 32, 68-76.
- Ramsar. (1971). Manual de la Convención de Ramsar. *Guía a la Conservación sobre los Humedales*, 4a. Irán.
- RAMSAR. (2015). 12ª Reunión de la Conferencia de las Partes en la Convención sobre los Humedales. *Conferencia de las partes en la convención sobre humedales*. Punta del Este,

- Uruguay. Obtenido de https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/ramsar_cop12_conference_report_s_0.pdf
- REDH. (s.f.). Recuperado el 03 de 2019, de Red Hidroclimatológica de Risaralda: <http://redhidro.org/home/>
- Resl, R., & Restrepo, S. (2014). *Estado de los humedales de la cuenca alta del río Otún (Departamento de Risaralda, Colombia), una reinterpretación desde la estadística espacial*. Obtenido de Universidad San Francisco de Quito: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/3270>
- Roa, M. C., & Brown, S. (2016). Caracterización de la Acumulación de Carbono en Pequeños Humedales Andinos en la Cuenca Alta del Río Barbas (Quindío, Colombia). (Cladsia, Ed.) *Revistas UNAL*, 38(1), 117-135. doi:<https://doi.org/10.15446/caldasia.v38n1.57833>
- Rochette, P., & Hutchinson, G. L. (2005). Measurement of Soil Respiration in situ: Chamber Techniques. *USDA-ARS*. doi:http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1379?utm_source=digitalcommons.unl.edu%2Fusdaarsfacpub%2F1379&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages
- Rojas, F., Santoyo, G. H., González, E., Velázquez, A., & Pulido, J. I. (2017). La Ciencia del Suelo en el Ciclo del Carbono en México. *Elementos para Políticas Públicas -Programa Mexicano del Carbono*, 1(2). Obtenido de <http://www.elementospolipub.org/ojs/index.php/epp/article/view/19>
- Sánchez, M., Rojas, A., Pérez, J., Zúñiga, O., & Gascó, J. M. (2006). Actividad y biomasa microbianas como indicadores de materia orgánica en sistemas de cultivo de maracuyá (*Passiflora edulis*) en Toro, Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, 55(4), 7-12. Obtenido de https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/474
- Suarez, D., Acurio, C., Chimbolema, S., & Aguirre, X. (2016). Análisis de Carbono Secuestrado en humedales Altoandinos de Dos Áreas Protegidas del Ecuador. *Ecología Aplicada*, 15(2), 171-177. doi:<http://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i2.756>
- USDA. (1999). *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo*. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Obtenido de https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf
- Valencia, J., Rodríguez, J. M., Arias, J. J., & Castaño, J. M. (2017). Valoración de los Servicios Ecosistémicos de Investigación y Educación como Insumo para la Toma de Decisiones desde la Perspectiva de la Gestión del Riesgo y el Cambio Climáticos. *Luna Azul*(45), 11-41. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321753629003>

- Valencia, M. P., & Figueroa, A. (2015). Vulnerabilidad de humedales altoandinos ante procesos de cambio: tendencias del análisis. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(26), 29-42. Recuperado el 20 de Mayo de 2018, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242015000100003&lng=en&tlng=es.
- Valois, H. (2016). *Sucesión primaria y ecología de la revegetación de selvas degradadas por minería en el Chocó, Colombia: bases para su restauración ecológica*. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid. Recuperado el Agosto de 2019, de <http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/19089/Tesis1124-160921.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Walteros, J. M. (Febrero de 2016). *Estudio Socio-Ecológico del Complejo de Huemdales de la Microcuenca Dalí, Cuenca Alta del Río Otún*. Obtenido de <http://repositorio.utp.edu.co:8080/repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/6210>
- Wenfang, X., Wenping, Y., Lilun, C., Minna, M., & Fenguo, Z. (2019). Responses of soil organic carbon decomposition to warming depend on the natural warming gradient. *Geoderma*, 343(0016-7061), 10-18. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.017>
- Zabala, M., & Gómez, Y. (2010). Biomasa fúngica y bacteriana como indicadoras del secuestro de C en suelos de sabanas sustituidos por pinares en Uverito, Venezuela. *Biología Tropical*, 58(3), 977-989. Recuperado el Octubre de 2017, de http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442010000300013&lng=en&tlng=es.

9. Anexos

Anexo 1. Medio De Cultivo Para Celulolíticos (Word,1980)

5g de Carboximetil celulosa, 1g de Nitrato de amonio, 50mL de solución salina al 0.85%, 15g de agar nutritivo, 950mL de extracto de suelo (v/v). pH 7,00. Extracto de suelo: 500g de suelo en 1 litro de agua destilada.

Anexo 2. Análisis de Varianza

Prueba de Normalidad (Test de Shapiro–Wilk)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
mg CO2/g	9	0,30	0,11	0,90	0,3924
BMC mgC/Kg	9	251,37	208,33	0,85	0,1174
pH	9	5,26	0,19	0,86	0,1690
% MO	9	26,57	4,47	0,84	0,0989
Hongos	9	79,97	77,03	0,88	0,2264
Heterótrofos	9	571,69	160,89	0,96	0,8238
Celulo	9	36,26	25,77	0,88	0,2549
% COS	9	15,41	2,60	0,84	0,0989

En los resultados del test de Shapiro–Wilk usada para contrastar el conjunto de datos, se acepta la hipótesis nula con el valor de $p > 0,05$, es decir que la población de datos se encuentra dentro de una distribución normal. En el único caso en que la hipótesis nula tiene un valor $p < 0,05$ es para la variable de humedad, por lo tanto, se realiza análisis de varianza para pruebas no paramétricas.

Anexo 3. Prueba de Tukey

mg CO2 /g suelo

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,23132

Error: 0,0085 gl: 6

Cobertura	Medias	n	E.E.
Eleocharis acutangula (M3) ..	0,22	3	0,05 A
Eleocharis acicularis (M2) ..	0,30	3	0,05 A
Hyparrhenia rufa (M1)	0,39	3	0,05 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

BMC (mg C- / Kg)**Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=219,66921**

Error: 7688,4931 gl: 6

Cobertura	Medias	n	E.E.	
Eleocharis acutangula (M3) ..	70,81	3	50,62	A
Eleocharis acicularis (M2) ..	181,24	3	50,62	A
Hyparrhenia rufa (M1)	502,05	3	50,62	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

pH**Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,12101**

Error: 0,0023 gl: 6

Cobertura	Medias	n	E.E.	
Hyparrhenia rufa (M1)	5,06	3	0,03	A
Eleocharis acutangula (M3) ..	5,23	3	0,03	B
Eleocharis acicularis (M2) ..	5,49	3	0,03	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

% MO**Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=2,97478**

Error: 1,4100 gl: 6

Cobertura	Medias	n	E.E.	
Hyparrhenia rufa (M1)	21,37	3	0,69	A
Eleocharis acutangula (M3) ..	26,92	3	0,69	B
Eleocharis acicularis (M2) ..	31,41	3	0,69	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Hongos**Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=171,66855**

Error: 4695,5268 gl: 6

Cobertura	Medias	n	E.E.	
Eleocharis acicularis (M2) ..	46,46	3	39,56	A
Eleocharis acutangula (M3) ..	48,00	3	39,56	A
Hyparrhenia rufa (M1)	145,46	3	39,56	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Heterótrofos**Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=402,22620**

Error: 25777,6646 gl: 6

Cobertura	Medias	n	E.E.	
Eleocharis acicularis (M2) ..	469,92	3	92,70	A
Eleocharis acutangula (M3) ..	591,43	3	92,70	A
Hyparrhenia rufa (M1)	653,72	3	92,70	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Celulo

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=57,52540

Error: 527,2568 gl: 6

Cobertura	Medias	n	E.E.
Eleocharis acicularis (M2) ..	15,49	3	13,26 A
Eleocharis acutangula (M3) ..	40,76	3	13,26 A
Hyparrhenia rufa (M1)	52,54	3	13,26 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

a. Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Cobertura	N	Medias	D.E.	Medianas	Promedio rangos	H	p
%H	Eleocharis acicularis (M2) ..	3	91,61	1,19	91,11	7,33	5,96	0,0250
%H	Eleocharis acutangula (M3) ..	3	89,15	2,28	87,93	5,67		
%H	Hyparrhenia rufa (M1)	3	76,51	2,81	75,17	2,00		

Trat.	Ranks
Hyparrhenia rufa (M1)	2,00 A
Eleocharis acutangula (M3) ..	5,67 A B
Eleocharis acicularis (M2) ..	7,33 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 4. Análisis de Correlaciones de Pearson

Coefficientes de correlación

Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades

	%H	mgCO ₂ /g	BMC	pH	%MO	Hongos	Heterótrofos	Celulo
%H	1,00	0,22	4,2E-03	0,01	2,9E-03	0,21	0,42	0,26
mgCO ₂ /g	-0,46	1,00	0,13	0,47	0,31	0,27	0,69	0,99
BMC	-0,84	0,54	1,00	0,07	0,04	0,11	0,72	0,55
pH	0,82	-0,28	-0,62	1,00	3,2E-05	0,13	0,20	0,08
% MO	0,86	-0,39	-0,68	0,96	1,00	0,11	0,20	0,06
Hongos	-0,46	0,41	0,57	-0,54	-0,57	1,00	0,07	0,09
Heterótro..	-0,31	0,15	0,14	-0,47	-0,48	0,64	1,00	0,42
Celulo	-0,42	3,2E-03	0,23	-0,61	-0,65	0,59	0,31	1,00