



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 16 de Junio de 2017

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Sergio Andrés Orduz Tovar, con C.C. No. 91.535.366 de Bucaramanga,

autor(es) de la tesis titulado **Impactos de los procesos de desertificación en la microbiota edáfica sin disturbar en el norte del Huila** presentado y aprobado en el año 2017 como requisito para optar al título de

Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores" , los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTEE:

Firma:

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: “IMPACTOS DE LOS PROCESOS DE DESERTIFICACIÓN EN LA MICROBIOTA EDÁFICA SIN DISTURBAR EN EL NORTE HUILA”

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
ORDUZ TOVAR	SERGIO ANDRES

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
TORRENTE	ARMANDO

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
----------------------------	--------------------------

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

MAGISTER EN INGENIERA Y GESTIÓN AMBIENTAL

FACULTAD:

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA O POSGRADO:

MAGISTER

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2017 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 77



TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una **X**):

Diagramas___ Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general__**X**_ Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas_**X**___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___
Tablas o Cuadros___

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Word o algún procesador de texto.

MATERIAL ANEXO: GDB del proyecto y metadato

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser **LAUREADAS** o **Meritoria**):

NO APLICA

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español Inglés

1. **Bosque seco tropical / Tropical dry forest**
2. **Grupo funcional / Functional group**
3. **Calidad de suelo / soil quality**

RESUMEN DEL CONTENIDO:

El incremento de suelos impactados por desertificación ha causado la reducción de áreas para agricultura y la posibilidad de establecer áreas para recuperación. El Huila tiene la segunda zona más erosionada del país (desierto de la Tatacoa) la cual impacta notoriamente varios municipios del departamento. El objetivo del proyecto fue determinar la variación de las comunidades microbianas funcionales edáfica en suelos impactados por desertificación en la zona norte del Valle del Magdalena, para esto se identificó que el grupo funcional que más se afecta por la desertificación es fijadores libres de N ($P(MC)$ -perm: 0.0001), aunque no se presentó diferencia significativa entre heterótrofos totales y hongos totales, la desertificación genera cambio en la densidad poblacional de hongos ($P(MC)$ -perm: 0.0001) con relación a los demás grupos funcionales. De las variables bióticas y abióticas de mayor importancia fueron la concentración de carbono, humedad y pH siendo mayor esta última en zona desertificada, esta variables interactúan con los grupos funcionales y precisamente se afectan cuando hay zonas desertificadas. La desertificación genera impacto en comunidades microbiológicas en suelos de bosque seco tropical, en microorganismos fijadores libres de N_2 ; es por tanto que los planes de restauración o



recuperación de bosque seco tropical deben enfocarse en manejo de diversidad microbiana, particularmente en la relacionada con ciclo biogeoquímico de N; esto da una orientación a como deben ser establecidos los planes de manejo en pro de restauración y recuperación de suelos afectados por desertificación en zonas de vida de bosque seco tropical de la zona norte del valle del Magdalena, particularmente en esta zona de interés de conservación y producción ecológica.

ABSTRACT:

The increase of soils affected by desertification has caused agriculture area reduction and the possibility of establishing areas for recovery. El Huila has the second most eroded area in the country (Tatacoa desert) which has a notable impact on several municipalities in the department. The objective of the project was to determine the variation of edaphic functional microbial communities in soils impacted by desertification in the northern Magdalena Valley, for which it was identified that the functional group most affected by desertification is N-free fixatives (P (MC) -perm: 0.0001), although there was no significant difference between total heterotrophs and total fungi, desertification generates a change in fungi density (P (MC) -perm: 0.0001) in relation to the other functional groups. The most important biotic and abiotic variables were carbon concentration, humidity, and pH, the latter being more frequent in the desertified zone, these variables interact with the functional groups and are precisely affected when there are desertified zones. Desertification has an impact on microbiological communities in tropical dry forest, in N₂-free fixing microorganisms. It is therefore that the restoration or recovery plans for tropical dry forest should focus on the management of microbial diversity, particularly in relation to the biogeochemical cycle of N; This gives an orientation to how management plans for the restoration and recovery of soils affected by desertification in areas of tropical dry forest living in the northern Magdalena Valley, particularly in this area of conservation interest.



APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: PAOLA ANDREA GARCIA RINCÓN

Firma:

Nombre Jurado: CARLOS EMILIO REINA GALEANO

Firma:

Nombre Jurado:

Firma:

Impactos de los procesos de desertificación en la microbiota edáfica sin
disturbar en el norte del Huila

SERGIO ANDRES ORDUZ TOVAR

TRABAJO DE GRADO

Presentado como requisito para obtener el título de:
Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRIA EN INGENIERIA Y GESTIÓN AMBIENTAL
2017

Impactos de los procesos de desertificación en la microbiota edáfica sin
disturbar en el norte del Huila

SERGIO ANDRES ORDUZ TOVAR

TRABAJO DE GRADO

Presentado como requisito para obtener el título de:
Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental

Director:

Armando Torrente PhD.

Facultad de Ingeniería

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRIA EN INGENIERIA Y GESTIÓN AMBIENTAL

2017

Agradecimientos

Agradecimiento especial a mis Padres, mi esposa y dios por todo el apoyo, orientación y ánimos en el proceso.

A los profesores Armando Torrente por su paciencia, orientación, enseñanzas y apoyo en este proceso.

Al Servicios Nacional de Aprendizaje (SENA), especialmente al Centro de Formación Agroindustrial La Angostura y el Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e innovación (SENNOVA) por su apoyo en el desarrollo de la propuesta

Tabla de contenido

1. Resumen del proyecto	6
2. Planteamiento del problema	7
3. Justificación	9
4. Objetivos	10
4.1. Objetivos general.....	10
4.2. Objetivos específicos.....	10
5. Marco teórico y estado del arte	11
5.1. Características del Bosque seco tropical	11
5.1.1. Conservación de bosques secos tropicales	12
5.1.2. Ejemplos de estrategias de conservación de áreas.....	12
5.1.3. Parque Regional Desierto de la Tatacoa.	13
5.1.3.1. Alteraciones presentadas en la zona de Desierto de la Tatacoa.....	13
5.2. Efecto de la erosión en suelo.	14
5.3. Estrategias para evaluar erosión de suelo en ecosistemas	15
5.3.1. Análisis satelital de áreas impactada por erosión.	15
5.3.2. Índice Normalizado de Cobertura Vegetal.	17
5.4. Indicadores de calidad en suelos	18
5.4.1. Indicadores biológicos.....	18
5.4.2. Indicadores químicos de calidad de suelos.....	20
6. Metodología	22
6.1. Área de estudio	22
6.2. Procesamiento de imágenes	23
6.3. Selección de zona y realización de muestreo	24
6.4. Análisis fisicoquímicos de suelos	26
6.5. Análisis microbiológicos de suelos	26
6.5.1. Cuantificación de bacterias heterótrofas totales	27
6.5.2. Cuantificación de hongos totales	27
6.5.3. Cuantificación de fijadores libres de nitrógeno.....	27
6.5.4. Cuantificación de microorganismos productores de luminiscencia.....	28
6.5.5. Cuantificación de microorganismos bacterias patógenos	28
6.6. Conservación de microorganismos	28

6.7.	Determinación de potencial uso de bacterias aisladas	29
6.8.	Análisis de datos	30
6.8.1.	Cuantificación de áreas impactadas por desertificación	30
6.8.2.	Análisis de comunidades microbianas especializadas.....	30
6.8.3.	Análisis de parámetros químicos de suelos	31
6.8.4.	Correlación entre parámetros biológicos y químico	31
7.	Resultado y discusión.....	33
7.1.	Distribución de zonas productivas en el desierto de la Tatacoa	34
7.2.	Identificación de zonas erosionadas en la zona norte del valle del magdalena.	35
7.3.	Comportamiento químico y físico de suelos afectado por desertificación..	38
7.4.	Comportamiento de la microbiota en suelos afectados por desertificación	43
7.5.	Interacción parámetros químicos, físicos y biológicos.	49
7.6.	Avances en investigación y potencial uso productivo de bacterias aisladas. 56	
8.	Conclusión	59
9.	Recomendaciones	60
10.	Bibliografía	61
11.	Anexos.....	74
11.1.	PERMANOVA análisis parámetros químicos y físicos evaluados en el suelo	74
11.2.	PERMANOVA comparación de densidad de comunidades funcionales evaluadas en suelo.	76
11.3	PERMANOVA – post hoc comparación de densidad de comunidades funcionales evaluadas en suelos desertificados.....	77
11.4	PERMANOVA – post hoc comparación de densidad de comunidades funcionales evaluadas en suelo no desertificado	78
11.5	Análisis canónica de coordenadas principales entre variables bióticas y abióticas.....	80
11.6	Cluster de relación entre variables bióticas y abióticas de la zona de estudio 81	

1. Resumen del proyecto

El incremento de suelos impactados por desertización y desertificación ha causado la reducción de áreas fértiles e idóneas para agricultura y la posibilidad de establecer áreas verdes para recuperación. El Huila tiene la segunda zona más erosionada del país (desierto de la Tatacoa) la cual impacta notoriamente varios municipios del departamento. El objetivo del proyecto fue determinar la variación de las comunidades microbianas funcionales edáfica en suelos impactados por desertificación en la zona norte del Valle del Magdalena, para esto se identificó que el grupo funcional que más se afecta por la desertificación es fijadores libres de N ($P(\text{MC})\text{-perm: } 0.0001$), aunque no se presento diferencia significativa entre heterótrofos totales y hongos totales, la desertificación genera cambio en la densidad poblacional de hongos ($P(\text{MC})\text{-perm: } 0.0001$) con relación a los demás grupo funcionales. De las variables bióticas y abióticas de mayor importancia fueron la concentración de carbono, humedad gravimétrica y pH siendo mayor esta última en zona desertificada, esta variables interactúan con los grupos funcionales y precisamente se afectan cuando hay zonas desertificadas. La desertificación genera un impacto en comunidades microbiológicas en suelos de bosque seco tropical, y aunque influye en diferentes grupos funcionales, son los fijadores libres de N_2 los mas afectados por este disturbio (perturbación). Es por tanto que los planes de restauración o recuperación de bosque seco tropical deben enfocarse en manejo de diversidad microbiana, particularmente en la relacionada con ciclo biogeoquímico de N; esto da una orientación a como deben ser establecidos los planes de manejo en pro de restauración y recuperación de suelos afectados por desertificación en zonas de vida de bosque seco tropical de la zona norte del valle del magdalena, particularmente en esta zona de interés de conservación y producción ecológica.

2. Planteamiento del problema

El constante incremento poblacional, sumado con la expansión demográfica en el planeta ha sido una de las causas de incremento en las temperaturas ambientales, consecuentemente, la frecuente reducción de zonas forestales ha potencializado la problemática de calentamiento global. Dentro de este marco, uno de los principales problemas antropogénicos generados son las alteraciones de fuentes hidrológicas (Buytaert *et al.*, 2006), así como el deterioro de las características físicas, químicas y microbiológicas de suelos (Otero *et al.* 2011), que han ocasionado la expansión de zonas desérticas, áridas o erosionadas; limitando las áreas con adecuado grado de fertilización para su posible uso en planes de reforestación, agricultura y usos generales día a día mayores.

Colombia no está exento de estos eventos, en el departamento del Huila los casi 50,000 Barriles de petróleo mensuales y 191,255 Ha dedicadas a la agricultura (ACP, 2011; Macias, 2011) generan presión y deterioro adicional de las características tanto físicas como químicas en los suelos del departamento. Adicionalmente, es importante resaltar que el Huila es considerado un departamento altamente agrícola (Tafur *et al.*, 2006) el cual se ha enfocado en monocultivos como son el arroz, café, cacao y gran variedad de frutas (Gobernación del Huila, 2014) que representan el 13% del producto interno bruto del departamento y el 6,3% del país (MinCIT, 2013) y los cuales, en muchas ocasiones requieren modificaciones del paisaje y causando aun mayor deterioro de las características químicas y físicas de 1.393.210 ha (CAM, 2009), es por tanto necesario la continua fertilización con productos químicos. Además, el creciente desarrollo demográfico, el incremento del 5,11% en las actividades agrícolas y su tecnificación (Macias, 2011), el aumento en actividades industriales y mineras; y el ascenso en el escalafón de departamento competitivo del país (MinCIT, 2013) han potencializado el deterioro de los suelos y expansión de zonas afectadas por desertificación, en caso particular del departamento del Huila, la presencia de las zonas naturales incluido el parque regional denominado como “El desierto de la Tatacoa” (CAM, 2009) representa un potencial ambiente que tiene a extenderse e incrementar las zonas áridas de la región, las cuales, en algunos municipios puede

representar hasta el 98% de su territorio (Villalva & Osorio, 2007) por tanto es necesario establecer metodologías de recuperación y manejo ambientalmente eficiente de los suelos, con el fin de establecer nuevas áreas para el desarrollo agrícola o planes de manejo ambiental de la región (Rosario, Fajardo, Barrios, & Camargo, 2003) en especial dado la falta de información sobre las características y comprensión de la diversidad de microbiana en estos suelos, la cual es imprescindible para el manejo adecuado de los mismos.

Como medidas importantes, se deben buscar alternativas que permitan no solo el uso eficiente de recursos naturales, en particular los suelos, si no el uso de herramientas para establecer e implementar sistemas de manejo integral de los suelos, para lo cual es indispensable la comprensión de las características de estos tanto fisicoquímicas como microbiológicas sobre todo por que estas últimas son importantes indicadores de calidad de los suelos y pueden ser usados para procesos de reactivación o restauración de suelos impactados por procesos de desertificación.

3. Justificación

La desertificación es un problema real en el Huila, algunos municipios del departamento presentan suelos afectados por erosión de casi el 98% del territorio bajo su jurisdicción, lo que implica limitaciones en la productividad agrícola de esta zonas de interés, este proceso que aporta a la desertificación de suelos es de importancia sobre todo por la estimación del potencial incremento de la temperatura ambiental de hasta 4 °C en los próximos 50 años, sumado a la presión de este evento sobre la productividad de la región.

El Huila posee 32 sub ecosistemas los cuales se distribuyen por todo el departamento, uno de los menos valorados y evaluados es el Bosque seco Tropical que se localiza principalmente en el norte de la región del cual 56,576.41 ha fueron declaradas parque regional y por ende se realizaron estudios de evaluación de fauna y flora identificando 109 especies de flora, 456 de mamíferos, 62 de peces, 4 de anfibios, 58 especies de aves y 13 taxones de reptiles, pero existe desconocimiento de la fauna microbiana de los suelos que permita establecer parámetros de indicadores de calidad autóctonos del terreno, sin embargo, establecer estudios con cobertura apropiada para identificar la microfauna bacteriana no se facilita sobre todo por la escala que esta representa en comparación con el área de influencia del ecosistema, es por tanto necesario contemplar estudio a diferentes escalas para ser integrados en un solo análisis, usando herramientas de contexto macro y micro que sean representativos dentro de la evaluación de calidad de suelos desde el punto de vista microbiológico, para así identificar las características de la fauna bacteriana y establecer parámetros de referencia biológica.

Con el presente estudio se planteó evaluar el efecto de la desertificación en comunidades de bacterias edáficas de zonas sin disturbar en el área de influencia del desierto de la Tatacoa, así como la identificación y asilamiento de un genero con potencial biofertilizante, lo que permitiría mejorar los conocimientos del comportamiento eco sistémico de la zona de interés y a su vez favorecer el manejo integrado del recurso natural especialmente desde el punto de vista productivo.

4. Objetivos

4.1. Objetivos general

Evaluar el impacto de procesos de desertificación en la microbiota de suelos sin disturbar de la zona norte del valle del Magdalena del departamento del Huila.

4.2. Objetivos específicos

Identificar zonas impactadas por desertificación en suelos sin disturbar al norte del departamento del Huila

Determinar ensamblajes de grupos funcionales microbianos en suelos no disturbados impactados por desertificación en la zona del Magdalena al norte del departamento del Huila

Evaluar el efecto de la desertificación en la fauna microbiana de zonas sin disturbar en el Valle del Magdalena al norte del departamento del Huila

5. Marco teórico y estado del arte

El departamento del Huila es una zona con gran variedad de pisos térmicos, lo cual le permite establecer diferentes estrategias de producción agrícola como cacao, café, plátano y especies endémicas como pasifloras. Ubicado en la zona central de Colombia, abarcando en total 19,890 Km², es un departamento cuya producción agrícola es importante para el país puesto que representa el 10 millones de dólares del producto interno bruto nacional en el que incluye producción agropecuaria.

Dado que el suelo del departamento oscila entre 400 y 5,400 m de altitud, pueden ser registradas temperaturas desde bajo cero hasta 35°C en épocas de sequía, particularmente en la zona del Valle del Magdalena, de igual manera, lluvias prolongadas en épocas de Febrero a Mayo (Instituto Alexander von Humboldt, 1998). Esta área se localiza en la zona centro y norte del departamento y se caracterizan por ser una de las pocas zonas del país que aun conservan remanentes de bosque seco tropical; en esta zona se encuentran ubicados varios municipios como Baraya, Aipe, Palermo, Neiva y Villavieja; sin embargo, es Villavieja donde se localiza el centro de la zona de bosque seco tropical con condiciones climáticas más severas y es precisamente donde se establece un sistema de vida de tipo bosque seco tropical como un área de interés departamental (Rosario et al., 2003).

5.1. Características del Bosque seco tropical

El Bosque seco tropical (BsT) se caracteriza por ser una formación boscosa continua cuyas temperaturas son superiores a 25°C y se registran temperaturas máximas de 38°C con precipitaciones anuales entre 700 – 2,000 mm por año. Con una extensión en Colombia estimada de 8,146,597 Km² se distribuye en dos zonas geográficas siendo la llanura caribe la de mayor representatividad, aunque es el Valle del Magdalena la segunda zona de mayor extensión en el país y abarca los departamentos de Tolima, Cundinamarca y Huila (Instituto Alexander von Humboldt, 1998).

Los bosques secos tropicales se caracterizan por poseer menos del 50% de especies de bosque húmedo, además de especies en común. Aunque la riqueza de este

ecosistema se resalta a razón de ser una zona de migración de especies, particularmente en épocas de sequía, es por esto que el desarrollo de la diversidad en estos sistemas de vida se lleva a cabo principalmente en áreas cercanas de fuentes hídricas como ríos o quebradas (Instituto Alexander von Humboldt, 1998).

Los bosques secos tropicales han cobrado importancia ya que son catalogados como ecosistema de manejo prioritario dado que por sus características particulares presenta alto grado de fragmentación y existe escasa información sobre estos, además, dada la fertilidad de los suelos, se ha presentado un alto desarrollo demográfico entorno a estos sistemas deteriorando mas aun los pocos remanentes identificados, reduciendo cerca del 90% el BsT desde las últimas cuatro décadas (Manuel et al., 2012; Instituto Alexander von Humboldt, 1998).

5.1.1. Conservación de bosques secos tropicales.

Acorde al Plan Nacional de Restauración los bosques secos tropicales fueron catalogados como “Ecosistema en proceso de restauración”, indicando que son zonas de vida en constante reducción, de esta manera promover la implementación de estrategias para conservación y preservación de estos ecosistemas, los cuales pueden estar afectados por actividades antrópicas y naturales. La intención entonces es, mediante planes de manejo de ecosistemas, acorde a políticas gubernamentales locales restablecer la estructura y composición para la adecuado función de servicios eco sistémicos especialmente por que los dos mayores remanentes de esa zona de vida se encuentra ubicados en el norte del país y en la zona norte del Valle del Magdalena (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012).

5.1.2. Ejemplos de estrategias de conservación de áreas

En el marco internacional La Unión Internacional de Conservación de la Naturaleza (IUCN en inglés) es la entidad que determina los lineamientos de planes o programas de biodiversidad y contemplan características de la zona de vida como vida salvaje, diversidad genética, preservación de especies y servicios ecosistémicos, aunque es necesario tener presente que la conservación de zonas de vida puede ir en contra vía de la producción agrícola o pecuaria de los suelos allí ubicados (Reyers, 2013a).

Precisamente esta situación es la que dificulta la implementación de planes de recuperación de suelos, especialmente cuando la actividad económica de una región esta basada en la agricultura.

5.1.3. Parque Regional Desierto de la Tatacoa.

En el Huila existe un parque nacional natural de interés gubernamental el cual se llama Parque Nacional Nevado Del Huila, en el cual se implementan planes de manejo, cuidado y preservación de las zonas de influencia cuya gestión recae primordialmente en Parques Naturales Nacionales (PNN) de Colombia. Además, como parque regional, y en marco de la estrategia de conservación de bosques secos tropicales, el Parque Natural Regional Desierto de la Tatacoa con 330 km² es un ejemplo del esfuerzo departamental de la protección a este ecosistema sensible y contempla gestión y administración gubernamental (CAM, 2008; MInAmbiente, 2007) aunque la conservación no incluye toda la zona de influencia del Valle de Magdalena, solo aquellas donde los efectos erosivos son mas notables.

5.1.3.1. Alteraciones presentadas en la zona de Desierto de la Tatacoa

Las perturbaciones y los disturbios son los efectos más representativos a razón de alteraciones en zonas de vida, el primero se refiere a lo modificación de un régimen de disturbio y el segundo a eventos relativamente discretos temporales que afectan la función o estructura de un ecosistema, paisaje, comunidad o población, causando la pérdida parcial o total de sus atributos (Keane, 2013).

En marco general las sequias y erosión pueden ser considerados disturbios, mientras que eventos y actividades como producción agrícola o pecuaria, contaminación ambiental e incendios forestales pueden considerase perturbaciones (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012; Shakesby, 2011), precisamente este tipo de eventos son los que más efecto han generado en relación a perdida de diversidad y productividad en suelos de la zona norte del valle del Magdalena. Ahora, si bien no es cierto que el Desierto de la Tatacoa sea un sistema de vida desértico, la implicación social enmarcada a la erosión que en esta zona se presenta lo denota como una zona con estas particularidades, especialmente por la pérdida de propiedad físicas, químicas

o biológicas del suelo en zonas afectadas por esta problemática, que reduce la capacidad productiva de la zona (Rosario, et al, 2003).

Las problemáticas asociadas a desertificación en el Huila no son tan extremas como en otros desierto del globo, caso particular el desierto de Atacama en Chile, sin embargo cerca del 35% del territorio nacional si presenta algún tipo de erosión, la cual puede estar dividida en cuatro categorías erosión: ligera, moderada, alta y muy alta según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). En el Huila municipios como Altamira, Villavieja y Yaguara son los mas afectados por desertificación ya que el 99,4%, 99,3 y 84% respectivamente de su territorio presentan algún tipo de erosión (CAM, 2009).

5.2. Efecto de la desertificación en suelo.

Las principales consecuencias de la desertificación son los procesos de erosión y perdida de cobertura vegetal, para ambos eventos la pérdida de las características fisicoquímicas y microbiológicas, así como la pérdida de cubierta vegetal y ausencia hídrica soportan la erosión, sin embargo, la desertificación esta relacionada a procesos antrópicos, mientras que la desertización a procesos naturales (Hou, Jussieu, & Montpellier, 1996; Kassas, 1995).

La desertificación de un suelo puede ser causada por varios factores, uno de los mas recurrentes de origen natural es la lluvia puesto que diluyen nutrientes limitando la productividad de los suelos a razón de la reducción de microbiota, que a su vez, promueven el crecimiento vegetal (Miller et al., 2013; Svoray & Atkinson, 2013). Otro factor causante de erosión son incendios forestales, los cuales reducen la cobertura vegetal y la diversidad de microorganismos en suelos, lo cual genera perdida de ciclos metabólicos y la consecuente reducción de la calidad de los suelos (Shakesby, 2011). Desde el punto de vista antrópico, actividades como implementación de monocultivos son aquellas que afectan la calidad de suelo, en parte por que consumen los nutrientes o por que simplemente afectan la formación de agregados a razón de perdida de la estructura en los suelos (Martinezmena et al., 2008).

La perdida de agregados y consecuente cambio en la textura es otro de los factores determinantes en la erosión del suelo, aunque puede depender también de la concentración de arcilla (Pardini & Gispert, 2006), esto se suma a la baja disponibilidad

de nutrientes y la no continuación de ciclo biogeoquímicos por pérdida de la diversidad microbiana, especialmente por que a esta se le atribuye la viabilidad de nutrientes en suelos (Izquierdo et al., 2005; Rashid et al., 2016). Esto ocasiona que la cobertura vegetal que habita en la zona de vida no cuente con nutrientes ni estructura de suelo para su desarrollo, lo que implica que las especies que allí sobreviven deben adaptarse a sistemas radiculares particulares, como es el caso de las especies del desierto de la Tatacoa (Zuazo & Pleguezuelo, 2009).

5.3. Estrategias para evaluar la desertificación de suelo en ecosistemas

La evaluación de las características fisicoquímicas y biológicas de los suelos es indispensable para determinar el real efecto de procesos de pérdida de calidad edáfica causado por disturbios como desertificación. En donde se evalúan parámetros cuyos análisis pueden ser realizados de manera directas e indirectas, estas varían en la amplitud de zona de estudio o análisis *in situ*, puesto una de contrapone a la otra. Especialmente por que independiente de esta, los costos de aplicación pueden ser considerables para la implementación en sistemas o planes de restauración o recuperación, los cuales pueden ser procesamiento de grandes extensiones mediante imágenes satelitales o en su defecto análisis de parámetros puntuales de características físicas, químicos o biológicos de una zona de vida de interés.

5.3.1. Análisis satelital de áreas impactada por desertificación.

Los imágenes satelitales son representaciones digitales de áreas de estudio, mientras que las fotografías aéreas son la interpretación fiel del estado del suelos, tecnología usada durante mas de cuatro décadas con desarrollo continuo y mejoras de producto como resolución, cobertura y capacidad de equipos (Dodd, 1948).

La fotografía satelital se refiere a la interpretación fiel del estado del suelo, es una fotografía del terreno la cual es tomada desde el aire. Esta tecnología se ha usado por mas de cuatro décadas y ha tenido notables mejoras en el producto (Capderou, 2003). Particularmente, la resolución y cobertura de la fotografía varia según la capacidad de los equipos, entre ellos la cámara usada para el registro fotográfico y la altitud de vuelo del dispositivo; En Colombia, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi es el encargado de

la toma y suministro de fotografías oficiales de la geografía colombiana y es usada esta información como punto de referencia para estudios de cartografía política y productiva del país (IGAC, 2014).

Las imágenes satelitales son entendidas como digitalización de información recopilada por sensores remotos en satélites localizados en la estratosfera, los cuales orbitan alrededor de la tierra, estas genera información que puede ser usada para, entre otras cosas, análisis de aguas superficiales, estudios de suelos, seguimiento de radio nucleótidos, estimadores de calidad de suelo, entre otros (Capderou, 2003). Adicionalmente, estas pueden entregar información relacionada al clima, suelos, agua, topografía, densidad poblacional y mucho mas; esto es posible ya que los sensores detectan diferentes longitudes de onda, las cuales pueden variar según los requerimientos técnicos del análisis.

En funcionamiento existen varios sensores, cada una con especificaciones técnicas particulares o en su defecto, se refieren en alguna optimización de la versión del sensor y disponen de tecnología para que la resolución espacial (tamaño de visualización de objetos) sea mayor a razón de 0.1 a 20 m (Tabla 1) (Capderou, 2003).

Tabla 1. Sensores disponibles en el mercado para toma de imágenes satelitales y su resolución espacial. Tomado de Orduz (2014).

Nombre del Sensor	Resolución espacial (m)
Geoeye	0.34-0.36
Worldview	0.31-0.46
Pleiades	0.5
Quickbird	0.65
IKONOS	0.82
SPOT	1.5
Rapideye	10

Las imágenes satelitales se convierten en una herramientas adecuadas para estudio de áreas extensas, especialmente para determinar el uso y estado de los suelos, proyectar planes de recuperación de zonas alteradas por efecto naturales o actividades antrópicas como cultivos agrícolas, sin embargo es importante inicialmente establecer diferencia

claves entre imágenes satelitales y fotografía satelital (Mcroberts, 2011; Stumpf et al., 2014).

Dentro del paquete de imágenes satelitales, es posible desarrollar análisis sumamente específicos que proporcionen mayor información, posiblemente los Modelos de Elevación Digital (MED) es uno de los mas importantes, este, mediante recolección de información mediante sensores sumamente especializado, evidencia en tercera dimensión la topografía del terreno, permitiendo establecer los niveles de elevación de los suelos y la inclinación de los mismos (NOAA, 2014), uno de los principales limitantes de esta metodología esta relacionado con características meteorológicas del área de interés, la formación de nubosidad puede limitar la cobertura de estudio así como la inclinación del sol al momento de la adquisición ya que puede generar imprecisiones al momento del post procesamiento

5.3.2. Índice Normalizado de Cobertura Vegetal.

En 2012 Bhandari et al. propusieron el uso de imágenes satelitales como estrategia de análisis de cobertura vegetal en suelos, así establecer parámetros de clasificación de suelos, entre otras cosas con miras de establecer estrategias de conservación de suelos, especialmente por que las zonas de interés pueden ser extensas, lo que implica que las zonas de conservación sean de áreas efectivas pequeñas, especialmente aquellas que puedan presentar erosión (Reyers, 2013b; Zhang et al., 2010); sin embargo este método es usado principalmente para análisis, control y promoción de cultivos agrícolas, en marco de estrategias de agricultura de precisión (Sammouda et al., 2014).

El procesamiento de la imágenes implica el uso de cuatro bandas de espectro de análisis, incluye la clorofila en suelos. Con el uso de imágenes satelitales la vegetación puede ser diferenciada de los demás elementos de la imagen, para esto se requiere trabajar con la banda espectral que se ajuste a las necesidades (Tabla 2).

Tabla 2. Uso de bandas posibles en imágenes satelitales. Adaptado de Bhandari et al., 2012.

No. de Banda	Nombre	Longitud de onda (um)	Característica y uso
1	Azul visible	0.45-0.52	Máxima penetración del agua
2	Verde visible	0.52-0.60	Lectura de plantas
3	Rojo visible	0.63-0.69	Discriminación de vegetación
4	Infrarrojo cercano	0.76-0.90	Mapeo de biomasa
5	Medio infrarrojo	1.55-1.75	Contenido de materia orgánica
6	Infrarrojo térmico	10.4-12.5	Análisis térmico
7	Medio infrarrojo	2.08-2.35	Mapeo mineralógico

5.4. Indicadores de calidad en suelos

La calidad de suelos esta definida como las características o propiedades químicas y o biológicas de los suelos esto suele asociarse a sistemas productivos agrícolas (Rosario, et al, 2003). Sin embargo, la calidad del suelo puede ser también usada para las condiciones de el punto de vista de servicios ecosistemicos que este presenta, cambio de la calidad implica modificación en el régimen de biodiversidad, que implica efecto directo en toda la cadena trófica del ecosistema (Burns et al., 2013).

Un suelo o pierde calidad cuando pierde sus características fisicoquímicas y microbiológicas limitando la productividad del mismo, este proceso se denomina erosión, el cual se puede ser causada por agua de escorrentía principalmente; el efecto del viento dada la reducción de cobertura vegetal; perdida de características químicas por ausencia o reducción de los ciclos biogeoquímicos en los suelos; y, degradación física que puede ser generada por actividades antropogénicas (Hoyos, 2005; Martinezmena *et al.*, 2008; Oldeman *et al.*, 1991).

5.4.1. Indicadores biológicos

Existen diferentes indicadores biológicos para evaluar la calidad de los suelos, generalmente se realizan estudios relacionados con la cantidad de cobertura vegetal de la zona de estudio, sin embargo, otros organismos como artrópodos tienen participación

activa en el suelo, aunque se registra que son los microorganismos aquellos cuya participación define el cambio la oxidación de nutrientes y cambios biogeoquímicos edáficos (Blagodatskaya & Kuzyakov, 2013; Dandan & Zhiwei, 2007).

La concentración o densidad de microorganismos cumple roles importantes en la calidad de suelos, al momento de presentarse perturbaciones como la desertificación, la cantidad de carbono cambia a razón de la modificación de la estructura de biodiversidad de bacterias y hongos en el suelo particularmente las heterótrofas puesto son considerados microorganismos activos en suelos (Tisdall et al., 2012; Blagodatskaya & Kuzyakov, 2013). Precisamente la interacción de los microorganismos y macro invertebrados son los que le dan la estructura a los suelos y la ausencia de estos puede afectar el ecosistema completo (Kuzyakov & Blagodatskaya, 2015), además para el caso de los hongos son considerados importantes en procesos de estabilización de suelos debido a procesos erosivos (Tisdall et al., 2012).

Los ciclos biogeoquímicos son dependientes de bacterias, el cambio en la cantidad de microorganismos fijadores de nitrógeno atmosférico, nitrificantes o denitrificantes son importantes en la estabilidad de los macronutrientes de los suelos que pueden incluso definir los patrones de uso de los mismos (Cookson et al., 2007), precisamente se ha establecido la relación directa entre la disponibilidad de microorganismos nitrificantes y la cantidad o capacidad de transformación de nitrógeno en suelos bosques (Hynes & Germida, 2012).

La pérdida de enzimas es un factor determinante en la calidad de suelos, por ello se consideran un factor a evaluar ante cambio de servicio ecosistémico, sin embargo, su análisis demanda costos excesivos y tiempo para el desarrollo de los protocolos que esto demanda (Torsvik & Øvreås, 2002).

Independiente del tipo de suelo, microorganismos patógenos pueden ser aislados de los mismos, sin embargo, esto conlleva a pérdida de calidad de suelo dado que restringe el uso del mismo, según el tipo de microorganismos patógeno (humano o animal) aislado del suelo, particularmente por que este grupo de bacterias no pueden ser contempladas en procesos industriales, agrícolas ni mucho menos de restauración de suelos (Montgomery, 2004); el ejemplo más representativo de esto es *E. coli* o el grupo de

coliformes (totales o fecales) edáficos, los cuales aunque puedan participar activamente como heterótrofos, su presencia implica que dichos suelos presentan restricciones por que afecta la salud animal o humana que use, habite o migre por estos ecosistemas, más aún por que se considera un indicador negativo de calidad y aunque generalmente se considera que este grupo de microorganismos se presenta por actividad antrópica, ocasionalmente puede habitar en suelos (Alley, 2007; González-Félix, et al, 2007; Otero et al., 2011).

Perturbaciones en suelos pueden generar un efecto directo en la densidad de grupos edáficos, es el caso de microorganismos fijadores de nitrógeno, cambio en concentración de hongos o bacterias; esto se evidencia dado que la recuperación de la abundancia de estos grupos a niveles antes del suceso puede tardar hasta 40 años independiente de la época climática (Kihara et al., 2012; Li et al., 2013; Oliveira, et al, 2013)

Los cambios en la cuantificación de genes resulta un método completo para determinar el estado de calidad de suelos, estos muestran el comportamiento real de los microorganismos, lo cual puede favorecer estudios de cambios de diversidad estacionales y efectos de situaciones antrópicas sobre los suelos (Levy-Booth, Prescott, & Grayston, 2014), sin embargo, depende de metodologías que no son adaptables para todos los tipos de suelos e implican modificaciones de protocolos cuyos costos en tiempo y dinero pueden extender proyectos de evaluación de calidad de suelos.

5.4.2. Indicadores químicos

La perdida de calidad por erosión genera como primera consecuencia la reducción de minerales como C, N y P. sin embargo, el carbono es el de mayor relevancia a razón de ser un indicador de cantidad de materia orgánica, la cual esta asociada a fertilidad e los suelos.

El pH es un factor determinante en la fertilización de los suelos, cumple un rol importante ya que participa en la disponibilidad de nutrientes, en la viabilidad de microorganismos así como en su actividad enzimática (Landesman et al., 2014).

La textura es un factor determinante en la calidad de cualquier suelo, de esta depende el tipo de cultivo que se desea implementar, sin embargo, para la erosión es parte importante puesto precisamente cambio en la textura puede implicar desertificación (Ahmad, et al., 2013; Barrios et al., 2005).

6. Metodología

La evaluación de la fauna microbiana en suelos impactados por desertificación se realizó en diferentes etapas, inicialmente se identificó las zonas erosionadas en el área de interés, para ello se usaron herramientas de análisis macro como imágenes satelitales, de esta manera se seleccionaron con mayor precisión del área de estudio y muestreo, una vez delimitada, se realizaron análisis de diversidad de especies de bacterias de suelos con el fin de determinar la riqueza en zonas previamente identificadas como desérticas mediante las imagen satelitales.

6.1. Área de estudio

La zona de estudio se caracteriza por que su principal actividad productiva esta dada por la agricultura y menormente pecuaria, siendo la producción ovina la más representativa a razón de las condiciones por la poca producción vegetal que se desarrolla en la zona. Esta área se caracteriza por ser zona de vida bosque seco tropical y estar ubicado en la región norte del departamento del Huila en el Valle del Magdalena (CAM, 2006b), es además una zona considerara de interés para preservación y por ello se establecieron políticas de manejo con base a información obtenida de estudio geográficos realizador por la Corporación Autónoma del Alto del Magdalena e incluían conservación de patrimonios arqueológicos, establecimiento de sendero ecológicos como “sendero la Victoria” o inventario de puntos de agua (CAM, 2006a).

Dado que la zona valle del magdalena al norte del departamento implica una cobertura de casi 6,000 Km², se estableció como área de estudio zonas que no presentaran actividad agropecuaria o turística dentro de un polígono que abarca áreas importantes como es el parque regional el desierto de la Tatacoa el cual se encuentra en el centro del área de estudio (CAM, 2006b) (Figura 1) para posteriormente identificar zonas más caracterizadas y realizar la primera fase del estudio.

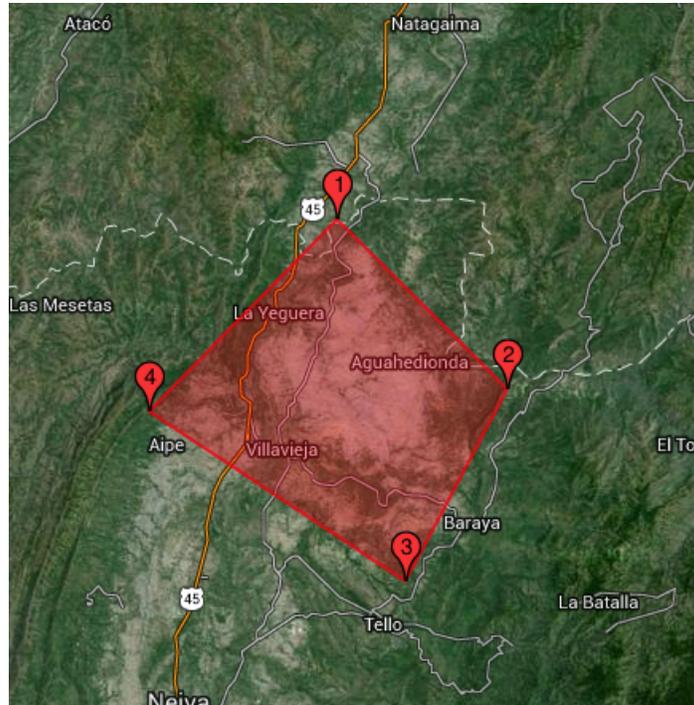


Figura 1. Polígono de selección para el análisis preliminar de la zona de interés, se muestran los puntos de formación del polígono. Geo referencia de: Punto1: 3.4147, -75.1685; Punto 2: 3.2680, -75.0215; Punto 3: 3.1021, -75.1094; Punto 4: 3.2488, -75.3305. Editado de Google Earth, 2016

Inicialmente las imágenes satelitales fueron descargadas de la plataforma online LandSatLook (Landsatlook, 2014) con el fin de establecer imágenes descriptivas del polígono en mención, posteriormente se realizó la adquisición de imágenes de alta resolución de las áreas de interés, para lo cual se implementaron sensores de cuatro bandas con resoluciones espaciales 1 m del satélite IKONOS usando como filtros fechas posteriores al 01 de enero de 2013 con el fin de adquirir información reciente en términos de adquisición de imágenes, así con nubosidad con cobertura menor al 20% del área de estudio ya que es una limitante de esta estrategia de análisis.

6.2. Procesamiento de imágenes

Las imágenes satelitales fueron procesadas con el software QGIS vs. 2.6 usando las herramientas de digitalización para caracterizar las zonas productivas y fuentes hídricas dentro del área macro de estudio, de esta manera se lograron poligonos

digitales de información complementaria para el estudio para diferenciar posibles ruidos en el procesamiento. Posteriormente se determinó el índice normalizado de cobertura vegetal (NDVI en inglés) con el fin de utilizar esta información para determinar zonas erosionadas ya que la vegetación es el indicador biofísico para la desertificación del suelo (Kidd et al., 2015), para ello se usaron las tres bandas de digitalización, de esta manera, las imágenes fueron procesadas acorde a la fórmula de la Figura 2.

$$RNDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

$$RNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$$

Figura 2. Formulas para el procesamiento del Índice normalizado de cobertura vegetal (NDVI en inglés). NIR se refiere a la reflectancia infrarroja, RED la banda 1 (600-700 nm) y GREEN la banda 2 (550 nm) (Bhandari, Kumar & Singh, 2012).

Con el fin de seleccionar finalmente las áreas de trabajo y muestreo, se realizó la caracterización del área de estudio mediante el INCV, en donde se definieron polígonos de producción agrícola, fuentes hídricas y zonas con INCV bajos en relación a la evidenciada en el procesamiento de la imagen, esto permitió discriminar zonas no disturbadas impactadas por desertificación o no desertificación. Como estrategia de análisis de áreas extensas, se usaron imagen con gran cobertura (2,000 Km²) para posteriormente ir seleccionando las zonas de mayor interés acorde a parámetro de selección en áreas de 200 Km² y menor extensión.

6.3. Selección de zona y realización de muestreo

Las zonas caracterizadas con bajo NDVI sirvieron para determinar cuáles son las áreas con desertificación y aquellas que no presentan pérdida de cobertura vegetal, esto dado que se convierte en un indicador de desertificación en el área de estudio, en la cual la información de producción agropecuaria serán excluidas aquellas zonas disturbadas; también se identificaron las zonas con bajo índice de cobertura vegetal y los de alto NDVI de zonas no intervenidas por actividad antrópica que fueron las zonas

de interés para el estudio (Landesman et al., 2014). Para ambos casos, en cada una de las zonas se trazó un polígono de aproximadamente 1 Ha, dicha zona presentó como característica estar alejado de casco urbano, así como distanciado en al menos 100 m de cualquier fuente natural hídrica (Kidd et al., 2015), por ello fueron seleccionados se manera preliminar dos por cada zona identificada y la selección final del polígono de interés se estableció con visitas en campo, confirmando que la zona contara con las características de exclusión para este estudio como actividad pecuaria, agrícola o turística.

Dada la prioridad de establecer comparaciones puntuales no espacio temporales para comparar las áreas de interés, en cada zonas (erosionada y no erosionada) se realizó un muestreo aleatorio simple en temporada seca donde el efecto de la temperatura en los suelos es mas notorio dada la reducción natural de cobertura vegetal, la selección de los puntos de muestreo se realizó con el programa de selección aleatoria de puntos de muestreo en QGIS vs. 2.6 que estableció las geo referencias de dichos sitios (Tabla 2) (QGIS Development Team, 2015) acorde a los resultados de identificación de zonas desertificadas.

Tabla 2. Geo referencia de los puntos de muestreo en las zonas de estudio desertificada y no desertificada de la zona norte del desierto de la Tatacoa.

Punto	Desertificada	No Desertificada
1	-75.14511000585488887; 3.3474511108916043	-75.14483018418317783; 3.34664024074367816
2	-75.1447393494634639; 3.34777646292607001	-75.14396916829105066; 3.34602154836684029
3	-75.14456975650615789; 3.3473788196712162	-75.14435080265270983; 3.34595074614488963
4	-75.14445977457828008; 3.34770309192544868	-75.14493387215662779; 3.34633017159620882
5	-75.1443478876201425; 3.34778648464046169	-75.14433627677478; 3.34642765288362298
6	-75.14446330149179687; 3.34762904693492036	-75.1443747175492831; 3.34661208444255998
7	-75.14381435421969968; 3.34723590042602703	-75.14373835253846323; 3.34593995505094455
8	-75.14418973075090946 ; 3.34766232002590991	-75.14371363229605549; 3.34614263122099098
9	-75.14472942511386577; 3.34776464413217978	-75.1451804510153778; 3.34653301522457181
10	-75.14428602571946669; 3.34721761330607226	-75.14360829640858697; 3.34583492135760086

Establecidos los puntos de muestreo, se procedió a realizar y ubicar *in situ* las georeferencias obtenidas con el software. En total, fueron tomadas 10 muestras por

zona realizando dos muestra compuesta de ≈ 1 Kg por zona es decir, un Kg de suelo para los análisis fisicoquímicos y un Kg para los análisis microbiológico (Landesman et al., 2014). Para el primer caso, la muestra de suelo se tomó de aproximadamente 30 cm de profundidad (Munson et al., 2012), con previa remoción de grava y material vegetal superficial, distanciado además de mínimo 10 cm de la planta mas cercana; las muestras de suelo fueron almacenadas en bolsas oscuras y transportadas a temperatura ambiente al laboratorio para su respectivo análisis. Para el segundo caso, dado que la actividad microbiológica de suelos no suele ser más profunda de 15 cm, las muestras se tomaron de 10 cm de profundidad, retirando cobertura vegetal y grava, además, estas muestras fueron almacenadas en bolsas estériles y refrigeradas a 4 ± 1 °C en neveras de icopor, así fueron transportadas en un periodo no mayor de 24 h al laboratorio para su procesamiento (Giacometti et al., 2013; Leckie, 2005).

6.4. Análisis fisicoquímicos de suelos

Las muestras fueron procesadas para realizar una caracterización básica de suelo donde se evaluaron indicadores de calidad (Barrios & Miranda, 2010; Toro, Requena, & Zamorano, 2010) analizando características físicas como textura, humedad gravimétrica y temperatura edáfica (*in situ*) registrada a 5-7 cm de profundidad; químicamente se determinó Carbono total por combustión gravimétrica y pH en solución 1:1, los cuales son análisis destinados a evaluar indicadores biológicos (Ahmad, et al., 2013; Barrios et al., 2005; Lee et al., 2006) estos análisis se realizaron en el Laboratorio de Ciencias Básicas del Centro de Formación Agrodinsutrial La Angostura del Servicio Nacional de Aprendizaje.

6.5. Análisis microbiológicos de suelos

Los análisis microbiológicos para cada una de las muestras estarán enfocados en el estudio de riqueza de bacterias (Angeli et al., 2014); para ello las muestras fueron procesadas usando la técnica de diluciones seriadas y siembra en profundidad para diseños experimentales de muestras ambientales (Avishai & Davidson, 2014). Se pesó 100 g de cada muestra, los cuales fueron diluidos por triplicado en solución salina

0.85% (p/v) con el fin de obtener diluciones 10^{-1} , 10^{-2} y 10^{-3} para su respectivo procesamiento acorde al grupo microbiológico funcional de interés, los cuales se indican a continuación.

6.5.1. Cuantificación de bacterias heterótrofas totales

El cultivo de estos microorganismos se realizó usando el agar Plate Count mediante el método de siembra por profundidad con agar fundido, inoculando 1 mL de la dilución y agitando la mezcla con el fin de homogenizar la muestra, este procedimiento se realizó por duplicado, las cajas de Petri fueron incubadas a 37 ± 1 °C durante 24 horas en condiciones aeróbicas, terminado el tiempo se determinó la densidad de bacterias heterótrofas medido en Unidades formadoras de colonia (UFC) por gramos de suelo (UFC/g) (Blagodatskaya & Kuzyakov, 2013).

6.5.2. Cuantificación de hongos totales

El cultivo de este grupo de microorganismos se realizó usando 1 ml de la última dilución de suelo en solución salina, el cual fue sembrado por duplicado en agar Rosa de Bengala como medio selectivo mediante siembra por profundidad e incubadas a 27 ± 1 °C durante cuatro días en condiciones aeróbicas (Martin, 1950) terminado el tiempo se determinó la densidad de hongos totales medido en Unidades Formadoras de Colonia (UFC) por gramo de suelo (UFC/g).

6.5.3. Cuantificación de fijadores libres de nitrógeno

El cultivo de este grupo de microorganismos se cuantificó mediante recuento en placa usando la metodología de siembra superficial con inoculación de 0.1 ml de muestra, usando medio libre de nitrógeno Ashby para promover el crecimiento de bacterias fijadoras libres de nitrógeno. Las placas fueron incubadas a temperatura ambiente durante un periodo no mayor a tres días en condiciones aeróbicas, así se pudo aislar organismos principalmente productores de exopolisacáridos (NTC, 2011), se determinó la densidad de bacterias fijadoras de nitrógeno por gramo de suelo (UFC-N/g).

6.5.4. Cuantificación de microorganismos productores de luminiscencia

La luminiscencia es una característica de microorganismos productores de auxinas o aquellos que presenta resistencia a radiación ultra violeta, se determinó la densidad de este tipo de microorganismos mediante recuento en placa por superficie usando 0.1 ml de muestra, inoculando en Agar Cetrimide suplementado con glicerol 1 % (v/v), las cajas de Petri fueron incubadas a temperatura ambiente (27 ± 2 °C) durante 24 horas en condiciones aeróbicas, terminado el tiempo las colonias que presentaron crecimiento se sometieron a luz UV de 250 nm con el fin de determinar fluorescencia (Dosanjh & Kaur, 2002), solo aquellas que presentaran luminiscencia se consideraron para el conteo final, la densidad de bacterias bioluminiscente medido en Unidades formadoras de colonia (UFC) por gramos de suelo (UFC-B/g).

6.5.5. Cuantificación de microorganismos bacterias patógenos

Aquellos microorganismos que resultaran con microscopia Gram negativos de forma bacilar, fueron posteriormente sembrados en diferencial y selectivo Chromocult para confirmar su clasificación, en caso de corresponder a coliformes totales o fecales o *E. coli* según las características comerciales del medio el microorganismo se descartaba del estudio (Rattanabumrung et al., 2012). La siembra fue realizada por agotamiento de una colonia e incubada a 37 ± 1 °C durante 24 horas en condiciones aeróbicas, en caso de presentar características se considera como Coliforme total (C-CT), Coliforme fecal (C-CF) y *E. coli*. Es de denotar que aunque la cepa fuese descartada del estudio, se realizó el registro documental del mismo.

6.6. Conservación de microorganismos

Cada uno de los morfotipos de hongos y bacterias, según la selección por características morfológicas fueron aislados y conservados. Para el primer caso se uso una mezcla de Glicerol 15% (v/v) más Skin Milk 15% (p/v) usando discos de agar con

crecimiento micelial (Hubalek, 2003). Para esto, la colonia fue sembrada inicialmente en una caja de Petri con agar Extracto de Malta e incubado por 5 días a 28 °C en condiciones aeróbicas. Paralelamente se adicionó 1.5 ml de la solución crioperservante en crioviales estériles de 2 ml. Una vez adicionados los discos de agar, estos fueron homogenizados mediante agitación mecánica a 3000 r.p.m y criopreservados a -80 °C en un Freezer Daihain Smart-Lab. Este procedimiento se realizó por triplicado con el fin de tener el banco de cepas de trabajo requerido para los análisis posteriores, a partir de lo cual se hicieron repiques en viales de 12 mL con 5 mL de agar Extracto de Malta incubados a 27°C. Todos los morfotipos fueron registrados fotográficamente usando microscopio Axio Scope A.1 y Estereoscopio STEMI 3015 acoplados a una cámara digital ERc 5s, mientras que las fotografías macroscópicas fueron tomadas con una cámara Nikon 3200.

Para el caso de bacterias, la conservación se realizó con Glicerol 15% (v/v) más Skin Milk 15% (p/v) mediante la re suspensión mecánica a 3000 r.p.m de una colonia purificada y verificada mediante coloración de Gram, usando crioviales de 2 mL con 1 mL de la mezcla Glicerol + Skin Milk (Hubalek, 2003), posteriormente se almacenaron en el banco de cepas del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura a -80 °C en un Freezer Daihain Smart-Lab.

6.7. Determinación de potencial uso de bacterias aisladas

Las bacterias parcialmente identificadas y que sean parte importante en la calidad de los suelos (ej. Fijadoras de nitrógeno), dado su importancia desde el punto de vista agrícola y en marco del uso adecuada de la biodiversidad, se estableció el potencial uso de estos microorganismos para el sector agropecuario, con miras a procesos de recuperación de suelos y restauración de ecosistemas en bosque seco tropical en la zona del desierto de la Tatacoa.

Para esto los microorganismos aislados fueron identificados fenotípicamente a nivel de género mediante pruebas bioquímicas y morfológicas (Zhang & Kong, 2014). Luego se realizó una búsqueda sistemática de primer nivel con el fin de establecer patrones de

uso y avances en investigación; se usó la base de datos Scopus (SCOPUS, 2017) con términos de búsqueda <azotobacter>, <agricultura> y <desert> usando como patrón de inclusión <AND> y limitando el rango de búsqueda entre 2007 y 2017, de igual manera se realizó la búsqueda de microorganismos con potencial de biofertilizantes bajo los siguientes términos de búsqueda <Pseudomonas>, <soil>, <biofertilizer> y <production>, usando como factor de inclusión AND entre fechas de 2006 y 2017.

Por otro lado, se realizó la búsqueda de patentes relacionadas con biofertilizantes, acorde a microorganismos identificados aislados de los suelos tanto desertificados como no desertificados, esto se realizó usando la base de datos mundial de patentes PATENTSCOPE (WIPO, 2017), se definió como término de búsqueda <azotobacter> y <biofertilizer> usando como término de inclusión <AND>.

6.8. Análisis de datos

6.8.1. Cuantificación de áreas impactadas por desertificación

Sobre las imágenes satelitales se cuantificó las áreas de los polígonos de selección con el fin de establecer de manera descriptiva las áreas productivas y aquellas con desertificación bajo el post procesamiento de INCV en la zona de estudio, para ello se usó la herramienta de cuantificación de área que QGIS acorde a los polígonos establecidos durante el estudio. Fueron definidos dos tratamientos para este estudio, caracterizado por zona de estudio clasificado como desertificado y no desertificado.

6.8.2. Análisis de comunidades microbianas especializadas

Los recuentos de microorganismos especializados usados como indicadores de suelo se compararon entre zonas de estudio y actividad metabólica evaluada mediante un PERMANOVA cuyo diseño considero dos factores así: análisis funcional (factor fijo de cuatro niveles, Heterótrofos totales, Hongos totales, microorganismos fijadores libres de nitrógeno y microorganismos luminiscentes), zona de estudio (factor fijo con dos niveles, desertificado y no desertificado) y la interacción entre factores. El análisis se realizó a partir de una matriz de similitud de Bray-Curtis mediante la suma de

cuadrados de los residuales basado en un modelo reducido (Tipo III) y 9,999 permutaciones, a partir del Log (x+1) de los recuentos microbianos (UFC/g de suelo) analizados (Anderson et al., 2008). Posteriormente se estableció un análisis de coordenadas principales (PCO) con el fin de determinar correlación entre las comunidades evaluadas de microorganismos y el efecto de la desertificación en los suelos, con miras de identificar los principales grupos funcionales que participan en el suelo (Anderson & Willis, 2012). El análisis estadístico se realizó usando el software Primer versión 7 y *PERMANOVA+ add-on* (Anderson et al., 2008).

6.8.3. Análisis de parámetros químicos de suelos

Los resultados de parámetros químicos analizados fueron comparados mediante un análisis PERMANOVA cuyo diseño contempló dos factores así: Análisis químico de suelos realizado (factor fijo de cinco niveles: Carbono total, CE, Humedad gravimétrica, densidad aparente y pH); zona de estudio (factor fijo de dos niveles Desertificado y no desertificado). El análisis se realizó a partir de una matriz de similitud Euclidiana mediante la suma de cuadrados de los residuales basado en un modelo reducido (Tipo III) y 9,999 permutaciones, a partir de la raíz cuadrada de los resultados de parámetros químicos analizados (Anderson et al., 2008). Posteriormente se estableció un análisis de coordenadas principales (PCO en inglés) con el fin de determinar agrupamientos de importancia entre los parámetros evaluados, acorde al efecto de la desertificación en suelos (Anderson & Willis, 2012). El análisis estadístico se realizó usando el software Primer versión 7 y *PERMANOVA+ add-on* (Anderson et al., 2008).

6.8.4. Correlación entre parámetros biológicos y químico

La correlación entre las características físicas, químicas y biológicas se estableció mediante un análisis de correlación de Pearson, a partir del Log de los recuentos microbianos en conjunto con la raíz cuadrada de los parámetros químicos y físicos analizados determinando así la correlación (R^2) y el valor de probabilidad entre parámetros (p); posteriormente se realizó el análisis de componentes principales (PCA) entre las variables de estudio. Estos análisis de correlación se realizó usando el software de libre acceso PAST versión 3.07 (Hammer & Harper, 2007).

Con relación a la interacción entre variables de estudio y con el fin de establecer el grado de correlación y la magnitud del parámetro, se realizó un análisis canónico de coordenadas principales (CAP en inglés); el análisis se realizó con base a los datos transformados acorde a la transformación anteriormente descrita y mediante matriz de similitud Bray-Curtis con análisis de factores por grupos y 9,999 permutaciones. Los datos fueron graficados mediante agrupamiento validado por SIMPROF y determinada la magnitud de la variable con una gráfica de burbujas acoplado al CAP (Anderson & Willis, 2012). El análisis estadístico se realizó usando el software Primer versión 7 y *PERMANOVA+ add-on* (Anderson et al., 2008).

7. Resultado y discusión

La zona de estudio inicial contempló la extensión aproximada de 2000 Km² (Figura 3a), la cual se redujo a la zona norte del polígono puesto es la zona que preliminarmente evidencia menor cobertura vegetal y es precisamente la zona cercana a la registrada como el desierto de la Tatacoa, en dicha zona se estableció el área de interés para los análisis requeridos, esta zona se localizó sobre el valle de Magdalena, evitando interferencia de ladera de montaña, lo cuales se confirmó mediante el modelo de elevación digital, donde se confirmó la zona llana en relación a la zona montañosa (Figura 3).



Figura 3. Área de estudio de la zona norte Valle del Magdalena al norte del Huila, en la figura se identifica del polígono inicial de estudio. Satélite Lansat. Imagen modificada de Google Eath 2016.

7.1. Distribución de zonas productivas en el desierto de la Tatacoa

Uno de los principales factores de análisis en el desierto de la Tatacoa es el uso de suelo, dado esta área es considerada parque regional (CAM, 2008), el uso de suelo es regulado acorde a políticas institucionales en pro de conservación de la zona de vida de bosque seco tropical. En el área de estudio se determinó que existe una alta extensión de cultivos agrícolas 3,533 Ha, entre los cuales se encuentran principalmente cultivo de arroz, pero también aplican la producción de algodón y particularmente mango, localizados principalmente en zonas aledañas a fuentes hídricas o bajo sistemas de riego implementados por el gobierno como estrategia de promoción de actividad agropecuaria para el municipio de Villavieja.

Si bien es cierto que también se registraron cultivos de cítricos según entrevistas a la comunidad, estos no son representativos y están enfocados en producción “familiar” cuya extensión por unidad no suele ser mayor a una hectárea y por tanto no son sistemas productivos representativos del municipio, registros indican que solo para arroz el área estimada de producción es de 2,800 ha cuyo distrito de riego es San Alfonso o el Porvenir cuya cobertura es de cercana a 1100 ha (Gonzalez, et al., 2010; Universidad del Rosario & Gobernación del Huila, 2015). Con las imágenes satelitales usadas para caracterizar esta área de interés, pueden ser observadas cerca de 3,400 ha de cultivo zonas de cultivo de arroz lo cual implica incremento en la producción de este cereal (Figura 4), mientras que otros sistemas como cítricos son poco implementados precisamente por que la rotación y rentabilidad de estos últimos es menor comparado con arroz. Por otra parte, a pesar que la producción de algodón en 2010 fue registrada de hasta 743 hectáreas sembradas, dicha actividad fue excluida por arroz a razón que la producción es principalmente para épocas de junio y julio, momento en que la incidencia solar es mayor y por tanto la calidad del algodón es mejor, sin embargo, la

rotación del mismo es baja comparada con el arroz y otros sistemas productivos, la producción de algodón se redujo particularmente por las regulaciones implementadas en 2017 por el ICA ya que incrementan costos de producción reduciendo los beneficio económico finales del cultivo a razón de que obliga a los productores en adquirir semillas certificadas y contratar un profesional para la producción (ICA, 2017).

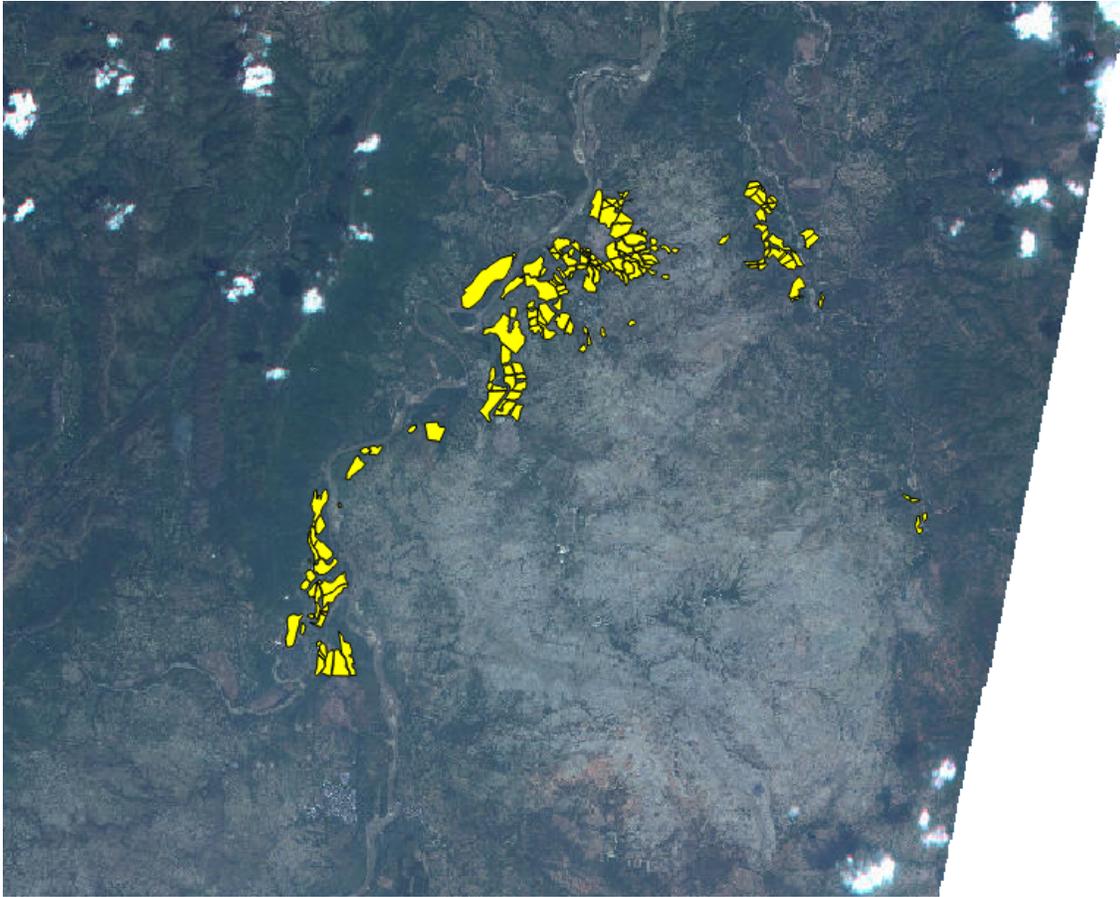


Figura 4. Dedicación agrícola en la zona norte del departamento del Huila. La unidades productivas agrícolas son principalmente cultivos de arroz y están demarcadas en color amarillo. Escala 1:50,000

7.2. Identificación de zonas erosionadas en la zona norte del valle del magdalena.

La zona norte de estudio es un área caracterizada por erosión natural, es precisamente esta área donde se ubica el desierto de la Tatacoa, las imágenes satelitales fueron tomadas en épocas de sequía (junio) por tanto representan la zona con impacto de época seca, lo que se evidencia con los valores de INCV que son inferiores a -1 Sin embargo, es importante denotar que los mayores índices de cobertura vegetal se evidencian en zonas aledañas o cercanas a ríos, precisamente los máximos valores 6.2 de cobertura vegetal se da por cultivos implementados en laderas del río Magdalena, así como de ríos aledaños (Figura 5).

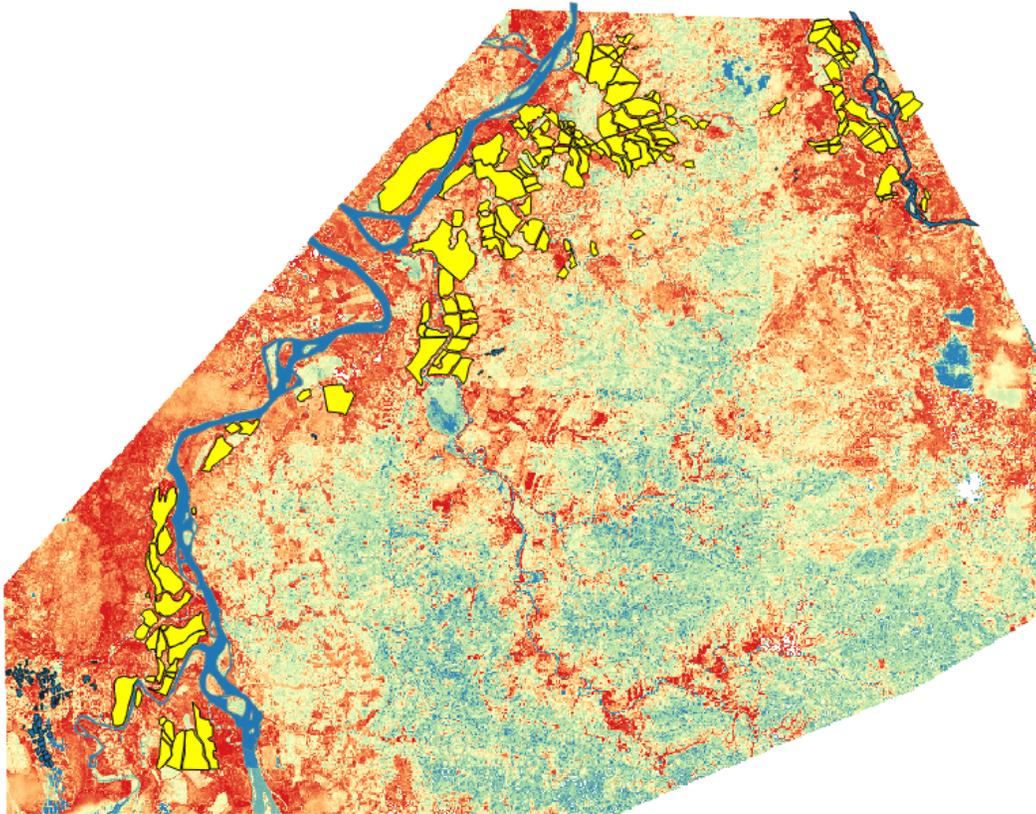


Figura 5. Imagen satelital procesada mediante Análisis de imágenes de Índice Normalizado de Cobertura Vegetal de las zona de estudio. En amarillo se registra polígono de zonas productivas, en azul representan cauces de río. Es registrado mayor cobertura vegetal (rojo) y menos cobertura vegetal amarillo o verde. Escala 1:70,000.

Dado que el cultivo de arroz demanda suministro continuo de agua con demanda de hasta $2,250 \text{ mm dia}^{-1}$; estos se desarrollan cerca de cualquier fuente hídrica (FAO, 2004; Rosell & Gómez, 2006), para el caso de Villavieja, precisamente estos sistemas productivos se desarrollan en las laderas de ríos como Villavieja o en caso menos

frecuentes, son usados pozos profundos de agua. Esto dado que los suelos en este municipio demandan agua, precisamente por que es una zona con alto impacto de desertificación, aunque esta perturbación se extiende solo en 5.8% (19.831 Km²) de la zona de estudio (220 Km²).

La zona de estudio final fue un área localizada al noreste del desierto de la Tatacoa, con una extensión final de 5.8Km² que se caracteriza por poseer zonas con baja, media y alta desertificación (Figura 6). Si bien es cierto que las zonas no desertificadas son más abundantes, esto dado que son característicos de bosque seco natural, ya que la zona de estudio es de difícil acceso para establecer zonas productivas.



Figura 6. Zona final de estudio para análisis de cambio de diversidad microbiana en Bosque seco Tropical, son identificadas zonas desertificadas con baja (azul) media (verde) y alta (naranja) intensidad para estudios biológicos. Escala 1:13,000

Dado que inicialmente se identificaron dos posibles opciones de selección que fueron determinadas por selección con imágenes tanto para zona desertificada como no

desertificada, la selección final se estableció a razón de visitas de campo por lo cual se descartan zonas cuya área se caracteriza por poseer roca sólida limitando el muestreo.

La zona que finalmente se selecciono no presentó actividad antrópica visible, excluyendo también cualquier tipo de ganadería. Esto concuerda con varios autores que indican que las imágenes satelitales, a pesar ser una herramienta útil para selección de zonas, no son deben ser usada de manera exclusiva y única es estudios de suelos, especialmente para estudios biológicos, esto dado que son representaciones espacio temporales definidas, las cuales no necesariamente representan el estado actual del ecosistema, es por tanto que las visitas en campo deben ser obligatorias para la selección final de zonas; sin embargo, el procesamiento de imágenes si orienta la selección y ubicación de las zonas a visitar y explorar, lo cual reduce el tiempo de exploración en zonas de interés que son impactadas por erosión y consecuente desertificación (Bargiel et al., 2013; Bhandari et al., 2012; Mcroberts, 2011).

Dado que los satélites tienen una cobertura de imagen alrededor de 20 Km² para alta resolución, las zonas de estudio se basan en imágenes con esta misma cobertura, por lo cual estudios de mayor extensión requieren recopilar más de una imagen, por lo cual generalmente zonas con gran áreas de estudio esta representado por mas de una imagen, que puede corresponder a diferente momentos temporales y características de inclinación de sol particulares (Capderou, 2003; Wang et al., 2011), por lo cual puede ser generado un error en los análisis de las zonas de estudio; las imágenes procesadas en este estudio difieren de meses de ser tomadas, por lo tanto no se genera un ruido considerable en la información que estas suministran (Capderou, 2003). Otro parámetro a ser considerado es la presencia de nubes, estas pueden ser interferentes en post procesamiento y arrojar datos no precisos, especialmente en cobertura vegetal, se recomienda siempre verificar que las imágenes presenten cobertura de nubes inferior a 10 % del área de estudio, lo cual en la zona del Valle del Magdalena es posible, pero se dificulta en zona de cordillera (Jouini et al., 2013; Vrieling et al., 2008).

7.3. Comportamiento químico y físico de suelos afectado por desertificación

En manera general, los suelos de la zona de desierto de la Tatacoa son de textura franco arenosa con pH de 4.5 y carbono total de 5.3 % lo cual es diez veces menor a suelos afectados por erosión en sistemas productivos silvopastoriles (Seddaiu et al., 2013) (Tabla 3) pero no comparado con la concentración de carbono 1.5 - 50 g de C por gamo de suelo registrado en el desierto de Atacama (Valdivia-Silva et al., 2012), por lo que se confirma que los suelos no son realmente desérticos, es considerado mas bien un sitio de vida de bosque seco tropical (Instituto Alexander von Humboldt, 1998).

Tabla 3. Resultados de los parámetros físicos y químicos analizados de muestras de suelo, se registra la media y la desviación estándar (SD) siendo n:10

Zona de estudio	Parámetro físico o químico											
	Carbono total (%)		Humedad gravimetrica (%)		Conductividad eléctrica		pH (unidades)		Temperatura edáfica (°C)		Densidad aparente (g/cm ³)	
	Media	DS	Media	DS	Media	DS	Media	DS	Media	DS	Media	DS
Desertificada	4.02	1.48	6.35	1.05	359.19	102.69	7.73	0.32	39.50	2.17	2.21	0.08
No desertificada	6.70	1.59	6.87	1.46	346.40	128.71	7.16	0.72	41.70	2.11	2.22	0.25

La zona desertificada presentó diferencia en Carbono total con la no desertificada (P -perm: 0.0007) (Anexo 1), siendo dos veces mayor en esta última (Figura 7a) (Tabla 3). De igual manera, el pH en la zona desertificada es mayor (P -perm: 0.0321), mientras que la temperatura del suelo es mayor en la zona no desertificada (42°C) (P -perm: 0.0456) (Figura 7b); sin embargo no se presentó diferencia entre la altitud, CE y densidad aparente. Los suelos de la zona de Villavieja se caracterizan por que su capacidad de retención hídrica es baja, además, dada la radiación solar, el suelo se calienta sobre 37°C (CAM, 2006c), lo cual se evidenció en los eventos de muestreo puesto en ambas zonas la temperatura del suelo superó la media indicada como referencia, siendo mayor en áreas donde la cobertura vegetal es mayor, esto se puede presentar por que en esta zona la retención de humedad gravimétrica puede ser mayor a razón de la actividad biológica en esta zona de estudio, comparado que la zona desertificada donde la retención de humedad gravimétrica es menor y por ende la temperatura es constante (Giacometti et al., 2013).

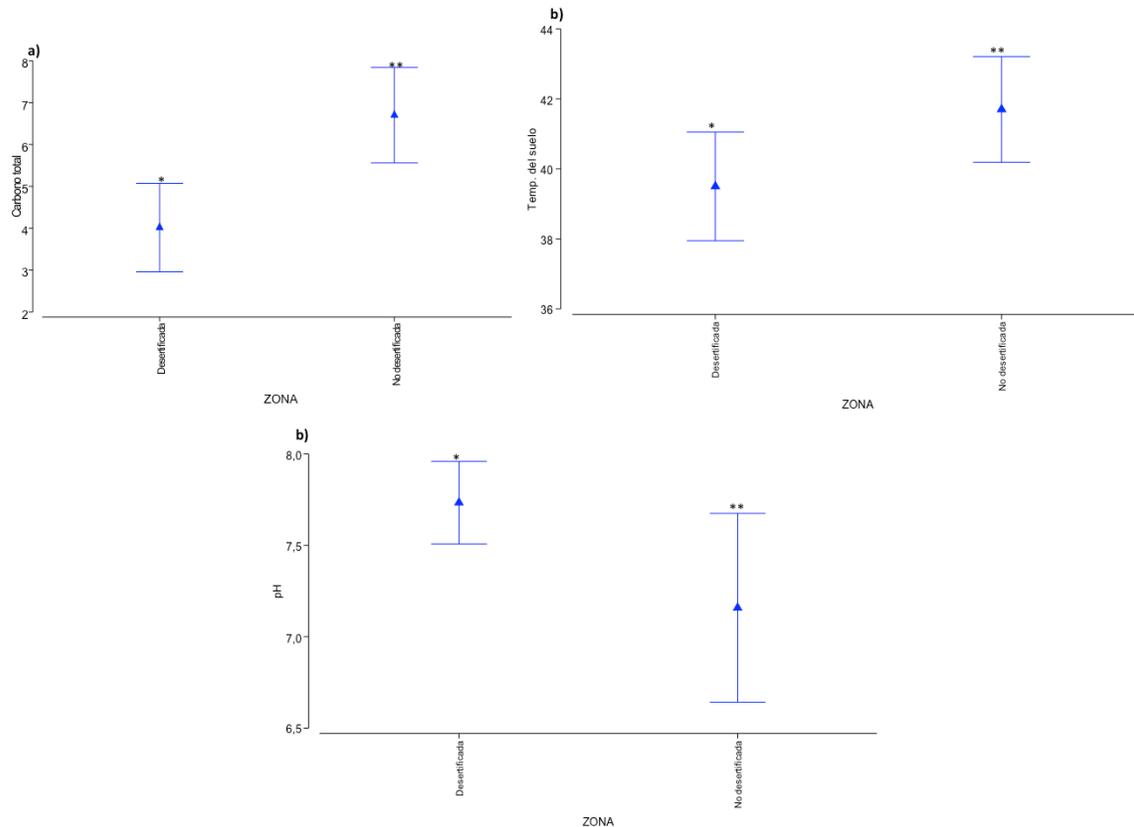


Figura 7. Análisis químicos y físicos realizados a suelos desertificados y no desertificación, son la media y desviación estándar de a) Carbono total, b) temperatura del suelo y c) pH, n: 10 para cada zona

Una de las principales características de la zona no desertificada es la presencia de cobertura vegetal según el INCV, lo que implica que la disponibilidad de materia orgánica es mayor (Figura 7a), bien sea por acumulación de materia vegetal en descomposición o simplemente por que la actividad biológica edáfica es mayor que incluye mayor posibilidad de formación de asociaciones los cuales establecen patrones para la funcionalidad del ecosistema (Kuzyakov & Blagodatskaya, 2015). El hecho que el carbono sea menor en suelos desertificados, implica además que la dinámica de poblaciones es limitada, por tanto el ingreso de nitrógeno al suelo es menor, agravando más la problemática sobre el incremento de población microbiana y desarrollo de zonas para producción vegetal, lo que limita actividades en procesos de restauración o recuperación de suelos del desierto de la Tatacoa (Parsons et al., 2013). Es precisamente el pH un factor determinante en indicar que se desarrolla actividad microbiana en suelos no desertificados, dado que la cobertura vegetal no es uniforme

en zonas no desertificadas, lo cual genera heterogeneidad en las lecturas de pH, aunque registra pH menor (7.1) (Figura 7b) de las zonas de estudio puesto la degradación de materia orgánica implica la producción de ácidos orgánicos que disminuyen el pH de los suelos (Loreau, 2001).

La tendencia de la humedad gravimétrica en los suelos indica que es mayor en la zona no desertificada (Figura 8a), aunque no existe diferencia significativa, la variabilidad de la información es claro indicador que en esta zona la influencia de la vegetación favorece la retención de humedad gravimétrica y es por ello que posiblemente la temperatura incrementa dado la mayor evaporación hídrica lo cual permite que organismos como artrópodos interactúen y formen agregados que favorecen la reducción del pH tal como se registra en el estudio (Maa et al., 2015) y es precisamente la razón que la zona no desertificada presenta mayor uniformidad en la densidad aparente de los suelos (Figura 8c), ya que la actividad microbiana edáfica (hongos, macro invertebrados, bacterias) favorece la estructura edáfica entre otras cosas por la formación de agregados (Daynes et al., 2012; Loreau, 2001; Maa et al., 2015).

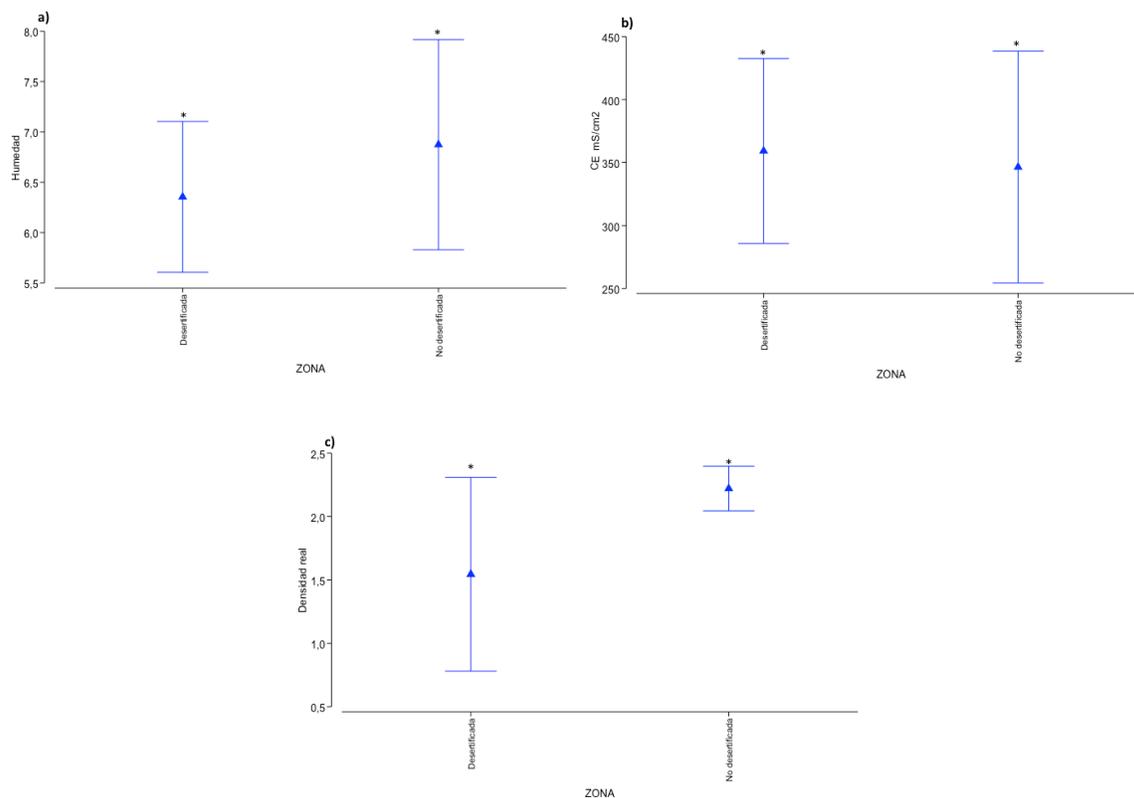


Figura 8. Análisis químicos y físicos realizados a suelos desertificado y no desertificación, se representa la media y la desviación de a) Humedad gravimétrica, b) Conductividad Eléctrica (CE) y; c) densidad aparente; siendo n: 10 para cada zona.

Comparados con suelos tropicales, la conductividad es incluso 100 veces mayor que en agroecosistemas andinos (Barrios et al., 2005), la conductividad eléctrica puede ser un claro indicador de salinidad en suelos, para el caso de la zona norte del Valle del Magdalena, los elevados niveles de CE indican que los suelos poseen elevada concentración de minerales, independiente que sea suelo desertificado o no; precisamente esto puede afectar el desarrollo de simbiosis tipos micorrizas y por tanto limita el tipo de vegetación que habite, la diversidad vegetal de la zona es particular y la formación de micorrizas puede ser limitada, situación similar a otras perturbaciones como el fuego (Longo, et al., 2014; Shukla et al., 2006). Es importante establecer cuales son los minerales que mayor concentración hay en los suelos independiente de estado erosivo en los mismos. Aunque el pH es idóneo para solubilizar macronutrientes como P; identificar los cationes o aniones del suelo permite establecer estrategias adecuadas de fertilización y manejo en pro de recuperación o restauración, esto dado según el tipo de ión, las actividades enzimáticas pueden ser inhibidas y por tanto, sin importar la cantidad de fertilizante aplicado o la concentración de enmiendas implementadas, la actividad biológica como solubilización de P o transformación de N no se desarrollará, esto será un limitante en procesos a mediano y largo plazo de manejo integral de suelos (Andersen, Chapman, & Artz, 2013; Verin, Cooke, Herenyiova, Patterson, & Garcia, 1998).

El modelo de Coordenadas principales (PCO) representa el 100% del total de la variación, por lo cual es fiel representación de la actividad química y física que se desarrolla en el suelo (Anderson et al., 2008). Este además indicó que uno de los principales componentes que influyen en la interacción de variables es la CE (Figura 9), esta se comporta de manera positiva y por tanto es proporcional a estados de afectación bajo efecto de erosión, diferente a los demás parámetros químicos y físico evaluados como temperatura de suelo, carbono total o humedad gravimétrica los cuales se comportan de manera homogénea tanto en zonas desertificadas como no

desertificadas y no varían representativamente. Precisamente la CE es uno de los parámetros mas evaluados en procesos erosivos por su relevancia en la interacción biogeoquímica así como el comportamiento hidrológico de suelos, es además uno de los indicadores de control en áreas con desarrollo de erosión antropogénicas lo cual se resalta con el análisis de coordenadas principales puesto es la variable química que podría representar cambios en desertificación, (Bellin et al., 2011; Zhang et al., 2010)

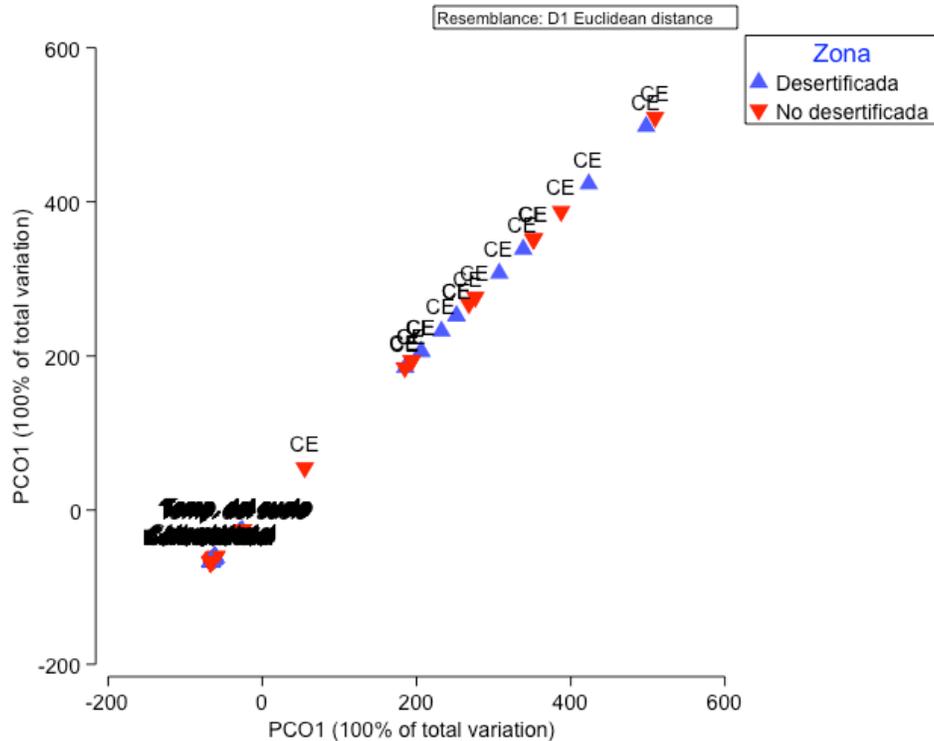


Figura 9. Análisis de coordenadas principales de parámetro químicos y físicos en suelos certificados y no desertificados de la zona norte del Valle del Magdalena.

Es importante establecer planes de control y medición de parámetros erosivos como CE, es por ello que las imágenes satelitales facilitan el análisis de suelos puesto se convierte en una herramienta integral y remota para estudio de diversidad (Rahman et al., 2009), integrando variables físicas con herramientas remotas fortalece el manejo de ecosistemas.

7.4. Comportamiento de la microbiota en suelos afectados por desertificación

Se evidencio diferencia entre los recuentos de grupos funcionales así como entre zonas desertificada y no desertificada (P -perm: 0.0001) (Anexo 2), esto quiere decir que en relación a comunidades funcionales, la desertificación puede afectar el comportamiento eco sistémico de diferentes maneras como es el caso de cambios en grupo funcionales y por ende tendencias biogeoquímicas del suelo.

En zona no desertificada se evidenció diferencia entre Hongos totales y Fijadores libres de nitrógeno (P (MC)-perm: 0.0001) (Anexo 3), así como heterótrofos totales y hongos totales (P (MC)-perm: 0.0007) (Figura 10a). En zona desertificada hay diferencia tanto Hongos totales como Fijadores libres de nitrógeno (P (MC)-perm: 0.0001) y heterótrofos totales y fijadores libres de nitrógeno (P (MC)-perm: 0.0001) (Figura 10b) (Anexo 4). Los recuentos de los microorganismo luminiscentes fueron diferentes para las zonas de estudio. La desertificación presentó un efecto directo principalmente en la densidad de poblaciones de comunidades de microorganismos fijadores de nitrógeno puesto la redujo a la mitad, al igual sucedió con microorganismos luminiscentes cuya densidad poblaciones en suelos erosionados es menor.

Es normal que procesos de perturbación o disturbios generen reducción en la densidad de microorganismos, para el caso de incendio forestal puede representar reducción de microorganismos con posibilidad de recuperar la riqueza inicial incluso 40 años después de sucedida la perturbación (Asiegbu, 2015; Rodríguez et al., 2013), lo cual indica que la desertificación no tiene efecto notable en comunidades como hongos y bacterias heterótrofas como reducción de densidad de grupos funcionales, lo que indicaría que la desertificación no necesariamente ocasiona perdida de diversidad, mas bien implicaría modificación en la riqueza de especies, lo cual favorecería procesos de restauración, ya que los recuentos microbianos son constantes. Esto es importante considerando que los microorganismos heterótrofos y hongos son reguladores de carbono en suelos (Trivedi et al., 2013), es decir, que el efecto de la desertificación esta enmarcado en otras fuentes de macronutrientes como el nitrógeno indicando que suplementar carbono en forma de enmiendas en el suelo, no necesariamente es el mecanismo mas acertado particularmente por la concentración de materia orgánica esta sobre 4% en suelos afectados por desertificación.

La media de heterótrofos y hongos totales es similar en las dos zonas de estudio, las comunidades tienen a ser más variantes entre puntos de muestreo en zonas no desertificadas, esto se puede presentar por que la cobertura vegetal no homogénea favorece el crecimiento de estos generando grupos de microorganismos localizados cerca de estructuras radiculares (Kuziyakov & Blagodatskaya, 2015)

Tanto las bacterias (heterótrofos totales) y hongos conviven en suelo y son precisamente aquellos que en conjunto favorecen la formación de agregados (van Eekeren et al., 2010), se evidencia que ambos grupos taxonómicos interactúan con densidades de población similares independiente del estado de desertificación del suelo, sin embargo en zona no desertificada (Figura 10a) la densidad de hongos es mayor, posiblemente por que en esta zona se evidencia mayor formación de agregados y son los hongos, cuyas hifas pueden extenderse por más de 10 m de longitud, los que favorecen la estructura de los suelos, además de la solubilización de P y degradación de materia orgánica, permitiendo la incorporación de carbono en el ecosistema (Gupta & Germida, 2014; Jannoura et al., 2013; Smith, et al., 2014).

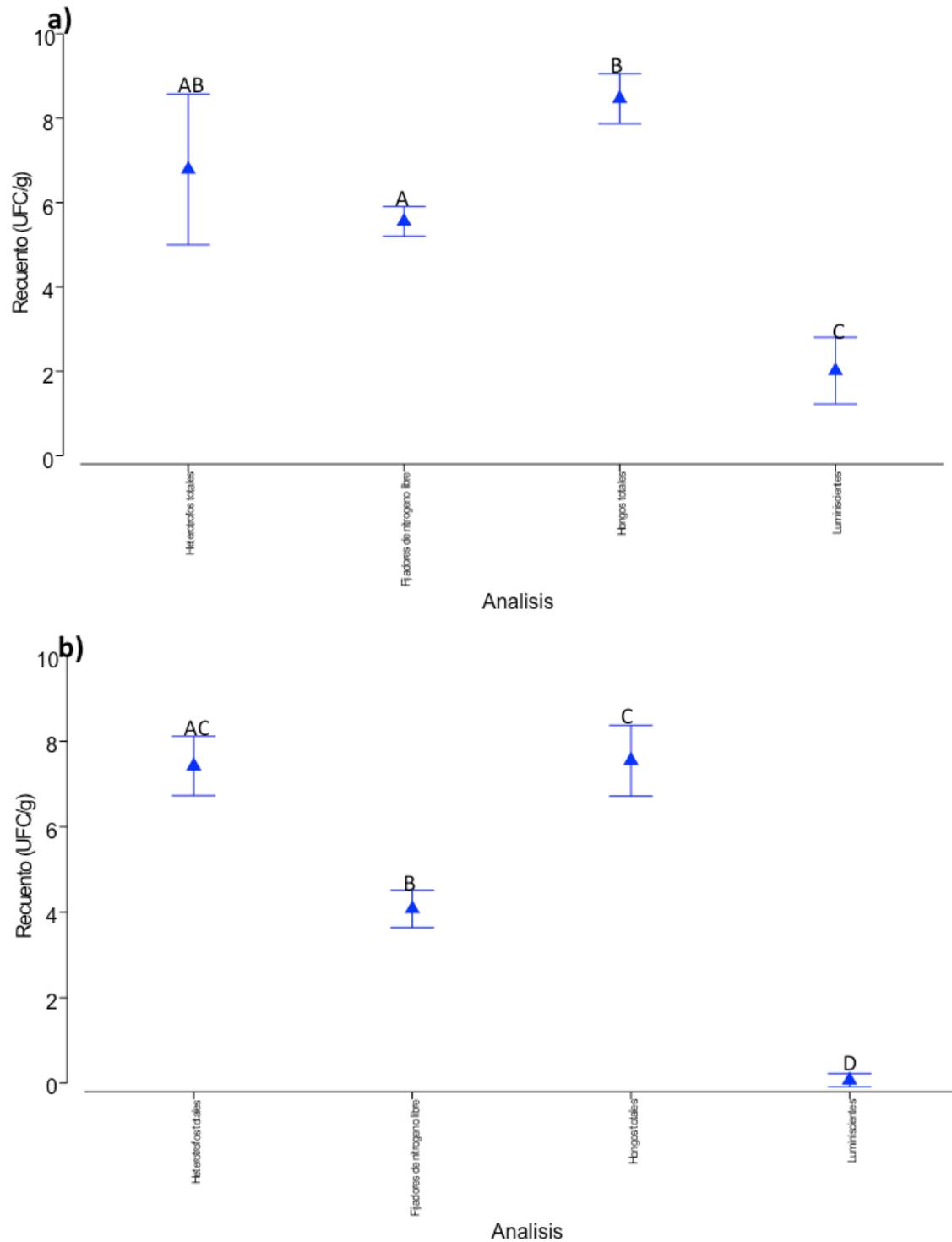


Figura 10. Recuento de grupos funcionales de microorganismos en suelos afectado por a) no desertificación y b) desertificación. Se representan la media del Log (x+1) de los recuentos (UFC/g) de microorganismos.

La densidad de microorganismos fijadores libre de N en suelos afectados por desertificación es menor (Figura 10b), este efecto puede estar dado en parte por que las condiciones radiculares limitan la formación de microorganismos rizosféricos asociados a plantas, disponibilidad de C y estructura de suelos (Bronk & Steinberg, 2008; Smith et al., 2014; Trivedi et al., 2013), características de los suelos erosionados donde el C es menor, pH mayor y la cobertura vegetal es escasa lo cual limitaría la participación de este grupo funcional en el suelo así como la generación de bio películas radiculares (Frioni, 1999). Esto es importante desde el punto de vista de gestión de suelos, los planes de manejo deben estar encaminados en suplir nutrientes necesarios para el procesos de restauración, una de las principales estrategias de suplir nitrógeno es mediante microorganismos nitrificantes, sin embargo, las condiciones de suelos limitarían esta actividad y por tanto sería necesario verificar medios para que este grupo de bacterias incremente su densidad como biofertilizantes (Frioni, 1999).

Es precisamente el grupo de los microorganismos nitrificantes son aquellos que representan un grupo importante en la interacción de la biota microbiana en suelos afectados o no por desertificación, los análisis de coordenadas principales representaron 99% y 98% de los modelos para zona desertificada y no desertificada respectivamente lo cual valida que es un grupo funcional importante en el modelo implementado para zona desertificada y no desertificada (Figura 11a y 11b). Para ambos casos, el grupo funcional fijadores libres de nitrógeno corresponden a grupos que interactúan positivamente en el modelo, es decir que ante el efecto de una perturbación como desertificación, son los que más cambian, además las interacciones de los grupos funcionales en zona desertificada representan una tendencia invertida mientras que en zonas no desertificadas demuestra que los ensamblajes evaluados se comportan positivamente ante la presencia de cobertura vegetal en zonas no desertificadas, precisamente por que ante la vegetación, la relación con la biota microbiana es mayor y por tanto incrementa, generando una relación positiva entre las partes (Smith et al., 2014).

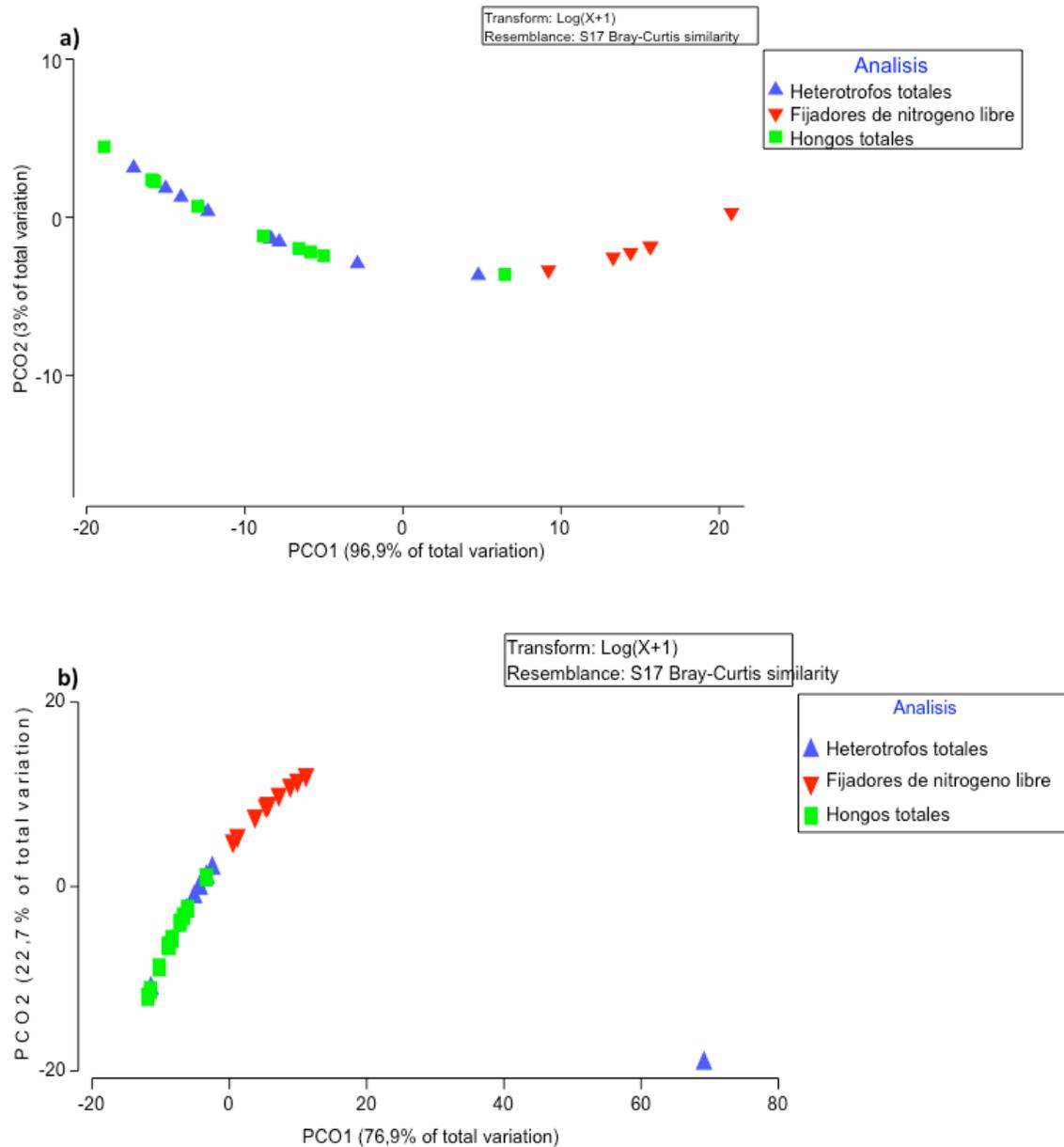


Figura 11. Análisis de coordenadas principales (PCO) de variables biológicas en suelos por a) desertificados y b) no desertificados.

El nitrógeno es una de las variables químicas que mas influyen en la distribución de grupos funcionales en suelos, precisamente los microorganismos fijadores de nitrógeno libre son grupo de bacterias que interactúan positivamente para incrementar cobertura vegetal y son considerados como estrategias de restauración de bosques (Burke et al., 2012; Stanturf et al., 2014), ahora se evidencia que también son indispensables en

	-				-					0.8943
Densidad aparente	0.2808 2	0.041741	0.13722	0.40933	0.1837 6		0.76342	0.42428	0.32582	5
Altitud	0.1503 9	0.12352	0.26944	-0.09598	0.6022	0.071842		0.69083	0.02789 1	0.67958
heterotrofos	0.3460 8	-0.24164	0.050077	-0.14663	0.0360 6	0.18923	0.09484 1		0.9361	0.09373 8
Hongos total	0.7904 5	0.001152 8	0.03583 5	-0.3023	0.3803 6	-0.23162	0.49109	0.019151		0.25471
Fijadores libres de N	0.3665 4	0.16613	0.11095	-0.28968	0.1780 3	0.0317 32	0.09847 3	0.38495	0.26722	

La interacción entre hongos totales y humedad gravimétrica se da puesto este grupo taxonómico se beneficia por esta última y es uno de los requisitos para que este grupo funcional colonice los suelos (Koné et al., 2010), es por tanto que en zonas desertificadas las comunidades de hongos pueden verse afectada; sin embargo, la densidad de hongos no cambia considerablemente entre zonas desertificada o no desertificada para bosques seco tropical del Valle del Magdalena lo que implica que en efecto hay una relación pero otros parámetros favorecen la densidad de estas comunidades como es el caso de la interacción con bacterias, las cuales tampoco se afectaron por desertificación, esta interacción entre los dos grupos taxonómicos evaluados se presenta por la simbiosis a razón de transformación de C orgánico, solubilización de nutrientes y control de patógenos para estas especies aunque son las bacterias la mas dominantes y se evidencia porque los recuentos bacterianos son mayores que cualquier otro grupo funcional (Grinhut et al., 2007; Gupta & Germida, 2014; Trivedi et al., 2013).

La correlación lineal entre bacterias fijadoras de nitrógeno y densidad aparente del suelo es un factor que hasta ahora se reporta en bosque seco tropical, particularmente impactado por desertificación (Leckie, 2005). La formación de agregados es precisamente un factor relevante en la estabilización física y biológica edáfica, es precisamente gracias a esto que se generan asociaciones entre grupos taxonómicos que promueven los ciclos biogeoquímicos y son precisamente estos agregados que le dan soporte a grupos funcionales como fijadores libres de N (Kuz'yakov & Blagodatskaya, 2015; Loreau, 2001), la desertificación causa la perdida de la densidad aparente, implicando que efectivamente la formación de agregados en estas condiciones de suelo son menores, aunque no se reduce la densidad de

microorganismo como heterótrofos y hongos, la densidad de comunidades de fijadores libres de N se afecta y por tanto limita actividades biológicas asociadas a N.

En este estudio además se reporta que la CE es un factor determinante en la población de hongos totales edáfico, la correlación positiva indica que las sales favorecen la producción de conidios, esto se puede presentar por que el incremento de sales pueden favorecer la producción de conidios (Dighton, 2003) aunque no se evidencia dicho cambio significativo en los suelos, precisamente por que la conductividad en las dos zonas es similar y no afecta producción de comunidades fúngicas.

La evaluación de componentes principales entre parámetros químicos y biológicos se evidencia que los parámetros biológicos están estrechamente relacionados con el impacto de desertificación de suelos, sin embargo la temperatura, altitud de zona de estudio y CE son parámetros que no influyen de manera directa en la perturbación evaluada (Figura 12). Dado que el muestreo de las zonas de estudio se realizó con altitud cercana no presento un efecto directo sobre el estudio, lo mismo sucede con la temperatura, sin embargo esta última si ha sido reportada como un parámetro de control de hongos en suelos, como es el caso en perturbaciones de incendios forestales en diferentes zonas de vida, que aplica para grupos taxonómicos como bacterias y hongos, evaluados en este estudio. (Pourreza et al., 2014; Rodríguez et al., 2013; Wang et al., 2013).

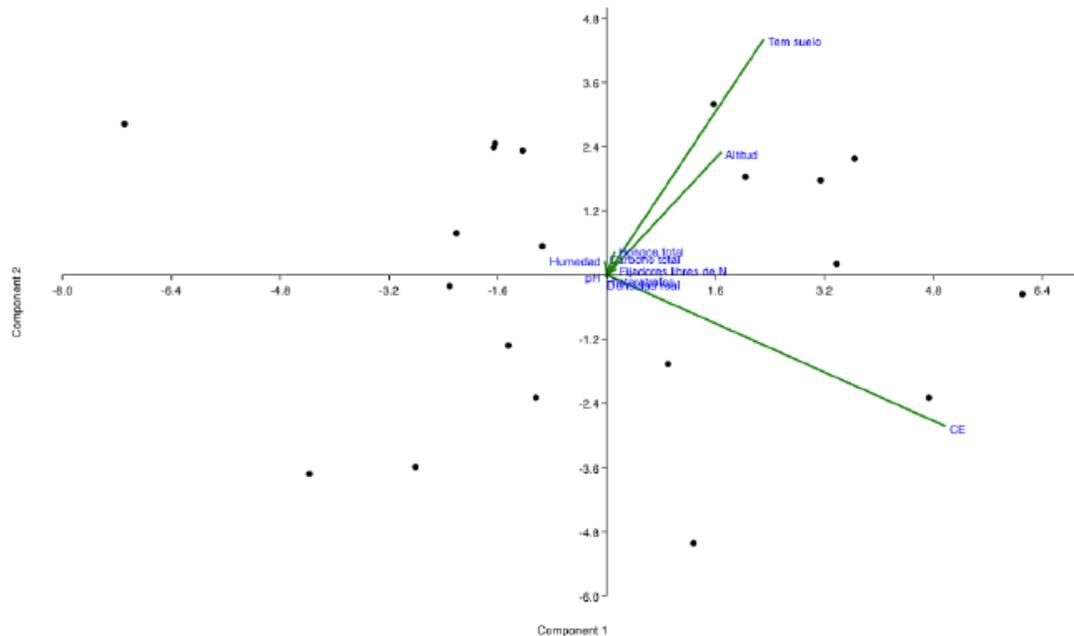


Figura 12. Análisis de componentes principales de variables bióticas y abióticas en la zona de vida de bosque seco tropical del norte del Valle del Magdalena.

En este estudio se denota que la temperatura del suelo no influye directamente en ninguno de los grupos funcionales evaluados, uno de los factores esta relacionada a la memoria térmica de microorganismos y por ende a la adaptación que estos han presentado a razón de condiciones ambientales constantes, lo que facilitaría su multiplicación y colonización en suelos desertificados o no desertificación (Andrade-Linares et al., 2016), exceptuando los microorganismos fijadores libres de nitrógeno que si pueden verse afectado por la desertificación pero no por la temperatura puesto estos dependen de condiciones como humedad gravimétrica y concentración de C la cual es menor en zonas desertificadas restringiendo la regeneración de N en el suelo y limitando la productividad de cobertura vegetal (Bronk & Steinberg, 2008)

El análisis canónico de coordenadas principales estableció cuatro grupos de interacción para la zona de vida de estudio, el primero y de mayor magnitud fue Altitud, CE y temperatura de suelo; el segundo fue Heterótrofos totales y hongos totales: el tercero pH y humedad gravimétrica y, por último carbono total y fijadores libres de N (Figura 13)

(Anexo 5). El primer gran cluster evidencia que a mayor altitud la temperatura relativa de los suelos reduce, lo cual favorecería los grupos taxonómicos de interés (hongos y bacterias) de las zona de estudio, sin embargo, dado que no se evidencio diferente significativa entre la temperatura de la zona desertificada y no desertificada no es notorio este efecto en este estudio, sumado a esto, la adaptabilidad propia de las especies en esta zona de vida permite versatilidad en la colonización de las zonas evaluadas, y es precisamente una de las mayores características del bosque seco tropical (Acosta, 2012), sus especies están adaptadas a las condiciones ambientales y para el caso del desierto de la Tatacoa, los microorganismos se han adaptado a condiciones erosivas.

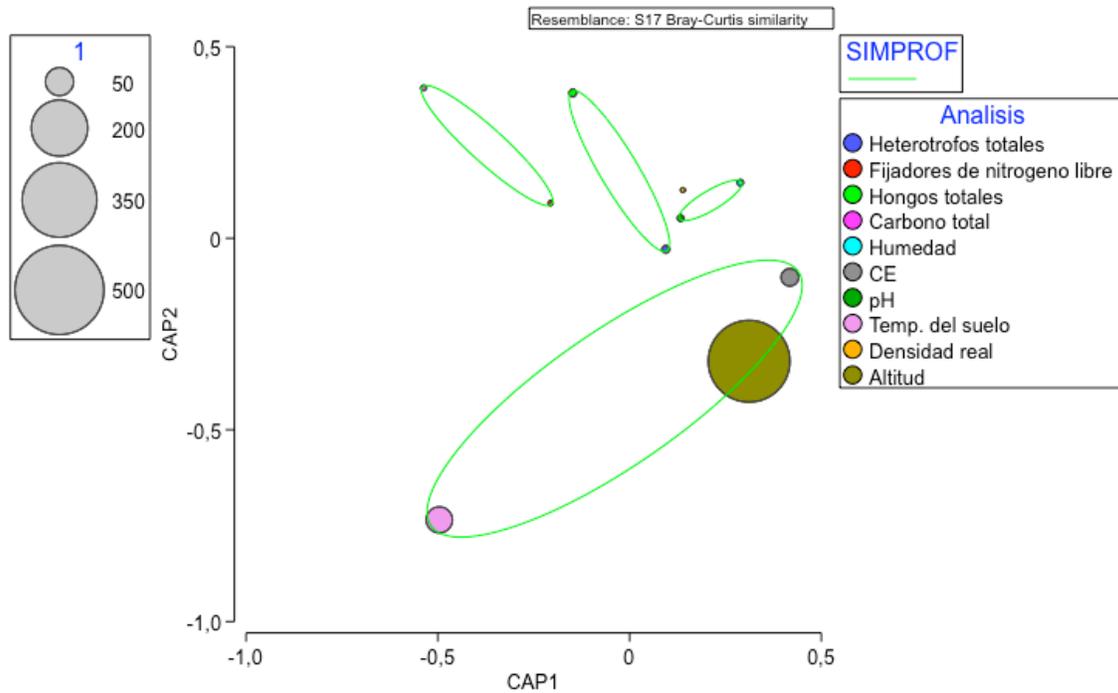


Figura 13. Análisis canónico de coordenadas principales de variables bióticas y abióticas en la zona de vida bosque seco trópicas afectado por desertificación al norte del Valle de Magdalena.

Otro clúster formado confirmar la relación entre hongos y bacterias (Figura 13, Anexo 11.6), dicha relación es positiva en relación a toda la interacción de la zona de vida, lo

que implica que la adaptación de las especies a condiciones extremas como temperatura termófila y humedad gravimétrica relativa baja permite que grupos taxonómicos se desarrollen independiente del estado erosivo de los suelos. Es importante resaltar estas dos características, precisamente la actividad enzimática en condiciones termófilas es una de los factores mas llamativos en la industria, así como en zonas de vida afectadas por incremento de temperatura edáfica (Trasar-Cepeda et al., 2008), son además considerados como la estrategia para el cambio ambiental ,puesto la obtención de enzimas con estas características seria soporte vital a procesos de degradación de contaminantes orgánicos en condiciones donde la temperatura o bajo porcentaje de humedad gravimétrica limitan la participación de otros organismos, no por mas, son las enzimas uno de los indicadores de calidad en suelos, no solo por la degradación de sustratos si no por la transformación y biogeoquímica ya que los microorganismos por medio de estos complejos proteicos permiten la de nitrificación, nitrificación, solubiliza ion de P entre otras muchas actividades geoquímicas (Bronk & Steinberg, 2008; Burns et al., 2013; Caldwell, 2005; Mazon, Piedecausa, Hernandez, & Garcíagarcía, 2007).

Dos variables ambientales como el pH y la humedad gravimétrica presentan relación directa, precisamente el incremento de la humedad del suelo puede favorecer la solubilización de minerales que ha su vez ocasiona una disminución de pH a razón de producción de compuestos orgánicos o inorgánicos generadores de protones (Seddaiu et al., 2013; Smith et al., 2014) . Estas dos variables son importantes en suelos afectado por desertificación, independiente cual perturbación la ocasione, ya que la mineralización del N y P esta directamente relacionado con el pH y la capacidad hídrica del sistema, es por tanto importante el control del pH el cual puede establecerse bajo planes de implementación de enmiendas orgánicas, esto puede incluir la adición controlada de agua al suelo por medio de la fertilización orgánica, esta estrategia se han implementado exitosamente en suelos áridos de sistemas agroforestales con el posterior incremento de la cobertura vegetal (Seddaiu et al., 2013), esta estrategia puede ser provechosa puesto limita el uso de fuentes hídricas como aguas subterráneas que puede afectar el suelo a razón de incrementar sales no beneficiarias para la microbiología edáfica ni de especies mayores (Giordano, 2009).

Los microorganismos fijadores libres de N están relacionados con la concentración de C en suelo, según el modelo Canónico de coordenadas principales y confirmado por la correlación lineal, dicha relación es directa, es decir, a mayor concentración de carbono la densidad de microorganismos fijadores de N incrementa. Aunque es necesario también tener presente que la correlación lineal indica que la densidad aparente de suelo también es un factor importante en las comunidades de bacterias con estas características. En conjunto, esto indica como primera medida el C es un factor controlador de las comunidades fijadoras de nitrógeno atmosférico, es por tanto la necesidad de materia orgánica en forma de C para que estos organismos puedan desarrollarse, precisamente por que no son N dependientes de material en descomposición, ya que su metabolismo lo realizan con base a su capacidad de fijar N atmosférico. Por otro lado, se evidencia que la densidad aparente del suelo es importante para la actividad metabólica puesto reduce la transferencia de aire en el suelo minimizando el contacto O_2 y microorganismo; precisamente este grupo funcional, son especies que el contacto directo con O_2 puede afectar la actividad de la nitrogenasa inactivando su capacidad de reducir el N_2 en formas de asimilables como ión nitrato (Rubio & Ludden, 2008); si bien es cierto estas bacteria se caracterizan por su producción de ex polisacáridos para evitar el contacto de su enzima con el oxígeno, la baja transferencia de aire por el suelo favorece aun más el desarrollo de estos organismos y esto se evidencia con su mayor r poblacional en zonas no desertificadas que tienen mayor densidad y cobertura vegetal; estos microorganismos son precisamente uno de los mas reconocidos desde su punto de vista de participación en el suelo en marco a ecología productiva (Power, 2013);, su capacidad de suministrar nitrógeno asimilable en a las plantas, la generación de metabolitos secundarios como promotores de crecimiento vegetal e incluso su capacidad de biocontroladores (Dembitsky & Rezanka, 2005; Jones et al., 2014; Offre et al., 2013) los posiciona como uno de los grupo de mayor relevancia en la zona de vida de Bosque seco tropical, bajo las condiciones ambientales que se desarrollan en la zona del norte en el valle del Magdalena, es por esto que estos organismos son considerados como relevantes e indicadores para el manejo de bosques y planes de restauración o recuperación de zonas de vida, contemplando además manejo de cobertura vegetal y promoción de especies mayores (Stanturf et al., 2014).

7.6. Avances en investigación y potencial uso productivo de bacterias aisladas.

En total se identificaron a nivel de género 26 morfotipos los cuales fueron conservados y reposan en el banco de microorganismos del Centro de Formación Agroindustrial La Angostura. El género mas representativo es *Bacillus* sp., sin embargo dos generos clasificados como biofertilizantes se lograron asilar (*Azotobacter* sp y *Pseudomonas* sp.) (Figura 14).

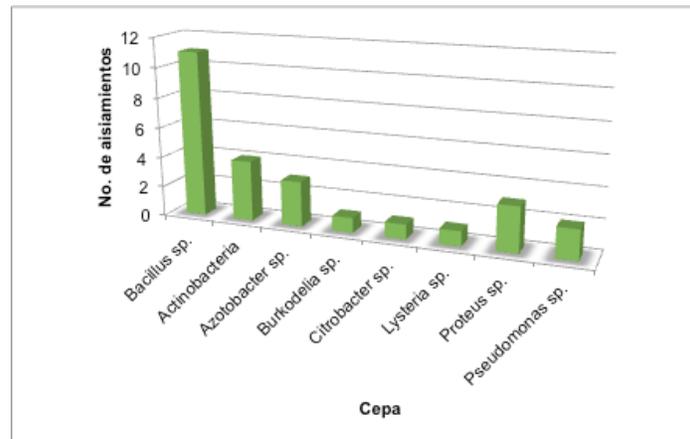


Figura 14. Cantidad y genero de bacterias aisladas de suelos impactado por desertificación en la zona norte del Valle del Magdalena.

Azotobacter sp. es una bacteria cuya principal característica es fijar nitrógeno atmosférico, pero también se caracteriza por ser productor de auxinas las cuales son consideradas promotoras de crecimiento vegetal, además de poseer la capacidad de osmorgulación y consecuente adaptación a zonas con elevada concentración de sales (Gross, 2003; Miller & Wood, 1996), su presencia en zonas desertificadas indica que existe un potencial biológico para la fertilización orgánica en los suelos del desierto de la Tatacoa, sin embargo la densidad de este grupo funcional puede verse afectada por otras variables como CT, pH o humedad gravimétrica del suelo, tal como se describió anteriormente; por tanto, considerando las variables de estudio como densidad de microorganismos, parámetros químicos y físicos, este es el principal microorganismo que puede ser considerado como agente para procesos de fertilización orgánica y bioestimulación de la comunidades edáficas, con miras de fortalecer la calidad del suelo

en pro de restauración de la zona de vida o recuperación para producción agrícola (Wood et al., 2015).

Azotobacter sp, es un grupo de fijadores de nitrógeno que ha adquirido importancia en investigación y desarrollo; es precisamente países agrícolas aquellos donde su investigación esta enfocada en la obtención y mejoramiento de especies fijadoras de nitrógeno, India es el país donde mas se reporta investigación con este genero seguido de Egipto (Figura 15).

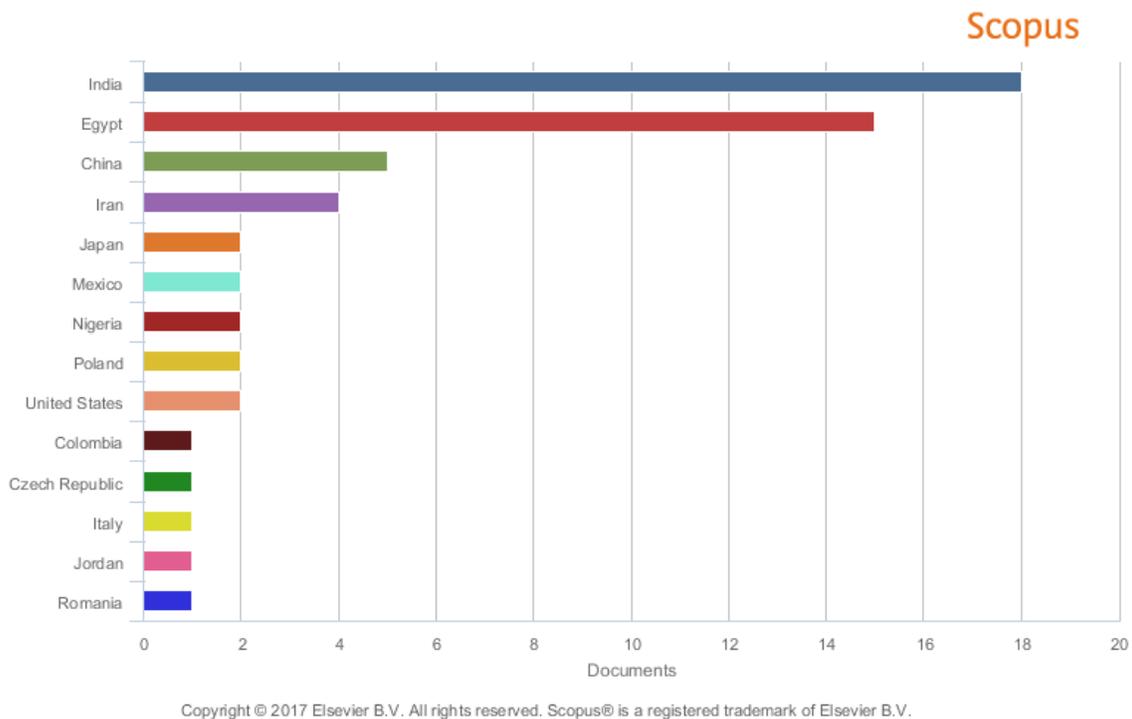


Figura 15. Países que desarrolla investigación y avances en obtención, manejo y modificación de microorganismos fijadores libres de nitrógeno.

Colombia no esta aislado de estas investigación, son reportadas de manera informal el asilamiento de microorganismos como *Azotobacter* sp., sin embargo no se tienen planes concretos de producción especifica de este genero, con miras de biofertilización en zonas desertificadas. En la actualidad, en Colombia comercialmente se puede adquirir grupos de microorganismos con fines de tratamiento de aguas residuales, pero no hay abundancia de productos enfocados a la fertilización a parte de hongos fitocontroladores.

El potencial de este genero es alto, precisamente en los últimos cinco años se reportaron 93 patentes internacionales sobre preparación, mejoramiento o implementación de procesos que incluyen *Azotobacter* sp. en su desarrollo, siendo el ultimo registro la patente WO/2017/069717 relacionada a la formulación de un biofertilizante sólido para mejorar la asimilación de nitrógeno en suelos y fortalecer sistemas productivos no dependientes de simbioses enfocados a producción agrícola (Isildak, et al., 2017), sin embargo no a restauración de bosque seco tropical especialmente de zona que deben ser consideradas como prioritarias de conservación por la biodiversidad característica que habita en esta (Costello & Ward, 2006).

8. Conclusión

La desertificación genera un impacto en comunidades microbiológicas en suelos de bosque seco tropical, esto fue determinado realizando la correlación de variables fisicoquímica consideradas indicadores de calidad de suelo y los grupos funcionales evaluados, ante impacto de la desertificación en la zona de estudio. En marco general, comparando zonas clasificadas como desertificadas y no desertificadas en la zona norte del Valle del Magdalena en el Huila, se determinó que esta perturbación si afecta los grupos funcionales evaluados (hongos totales, heterótrofos totales, microorganismos luminiscentes), sin embargo, son los microorganismos fijadores libres de N_2 los más perjudicados por este disturbio (perturbación). Dentro de este grupo, el género *Azotobacter* sp. y organismos actinomicetos fueron los mas abundantes de los microorganismos cultivables aislados, los cuales están relacionados con biofertilizantes comerciales o patentes internacionales. Es por tanto que los planes de restauración o recuperación de bosque seco tropical deben enfocarse en manejo de diversidad microbiana, particularmente en la relacionada con ciclo biogeoquímico de N, implementando estrategias como bio aumentación de este grupo funcional, toda vez que permita mejorar la captación de N atmosférico en suelos desertificados y las condiciones biológicas similares a suelos clasificados como no desertificados.

9. Recomendaciones

En relación a los indicadores evaluados, estudios con evaluación enzimática y mayor estudio de población pueden determinar de mejor manera las condiciones bióticas de áreas afectadas por desertificación, se recomienda contemplar mas indicadores especializados químicos y físicos considerando factores como costo de salida de campo y procesamiento del laboratorio. Dado que los métodos usados son limitantes para conocer solo algunos grupos de microorganismos, es necesario implementar estrategias que permitan evaluar y determinar la riqueza y / o abundancia de especies de bacterias en el suelo, independiente de si los microorganismos son o no cultivables en condiciones *in vitro*, de igual manera debe ser *considerado* realizar estudios de diversidad particularmente de comunidades, evaluado actividad metabólica en expresión para cada época climática. Por otra parte, cuantificar áreas desertificadas usando cronosecuencia podría facilitar la evaluación de la extensión de zonas afectadas por el disturbio evaluado, así estimar a mediano plazo la expansión del desierto de la Tatacoa y usar dicha información en los planes de manejo de suelo, los cuales deberían incluir programas de fertilización orgánica y bioaumentación de grupos funcionales edáficos.

10. Bibliografía

- Acosta, A. R. (2012). Anfibios de los enclaves secos en la ecorregión de La Tatacoa y su área de influencia, alto Magdalena, Colombia, *13*(2), 182–210.
- ACP. (2011). *Informe estadístico petrolero. Asociación Colombiana de Petroleos* (Vol. Colombia). Bogota, Colombia.
- Ahmad, W., Shah, Z., Jamal, M., & Shah, K. A. (2013). Recovery of organic fertility in degraded soil through fertilization and crop rotation. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. <http://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.01.007>
- Alley, R. (2007). Pollutant classification. In *Water Quality Control Handbook* (Alley, Rob, pp. 1–28). New York: McGraw Hill.
- Andersen, R., Chapman, S. J., & Artz, R. R. E. (2013). Microbial communities in natural and disturbed peatlands: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, *57*, 979–994. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.10.003>
- Anderson, M., Gorley, R. N., & Clarke, K. R. (2008). *PERMANOVA + for PRIMER. Guide to Software and Statistical Methods* (Vol. 1). Plymouth, UK: PRIMER-E.
- Anderson, M., & Willis, T. (2012). Canonical Analysis of Principal Coordinates : A Useful Method of Constrained Ordination for Ecology CANONICAL ANALYSIS OF PRINCIPAL COORDINATES : A USEFUL METHOD OF CONSTRAINED ORDINATION FOR ECOLOGY. *Ecology*, *84*(2), 511–525.
- Andrade-Linares, D. R., Veresoglou, S. D., & Rillig, M. C. (2016). Temperature priming and memory in soil filamentous fungi. *Fungal Ecology*, *21*, 10–15. <http://doi.org/10.1016/j.funeco.2016.02.002>
- Angeli, N., Boeckx, P., Hatton, P., Bod, S., Gelhaye, L., & Derrien, D. (2014). Soil Biology & Biochemistry Assimilation and accumulation of C by fungi and bacteria attached to soil density fractions. *Soil Biology & Biochemistry*, *79*, 132–139. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.09.013>
- Asiegbu, F. O. (2015). Fungal Community Shifts in Structure and Function across a

- Boreal Forest Fire Chronosequence. *Applied and Environmental Microbiology*, 81(22), 7869–7880. <http://doi.org/10.1128/AEM.02063-15>. Editor
- Avishai, B., & Davidson, C. E. (2014). Estimation method for serial dilution experiments. *Journal of Microbiological Methods*, 107, 214–221. <http://doi.org/10.1016/j.mimet.2014.08.023>
- Bargiel, D., Herrmann, S., & Jadczyzyn, J. (2013). Using high-resolution radar images to determine vegetation cover for soil erosion assessments. *Journal of Environmental Management*, 124, 82–90. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.03.049>
- Barrios-González, J., & Miranda, R. U. (2010). Biotechnological production and applications of statins. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 869–83. <http://doi.org/10.1007/s00253-009-2239-6>
- Barrios, E., Cobo, J., Rao, I., Thomas, R., Amezcuita, E., Jimenez, J., & Rondon, M. (2005). Fallow management for soil fertility recovery in tropical Andean agroecosystems in Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 110(1–2), 29–42. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.009>
- Bellin, N., Vanacker, V., van Wesemael, B., Solé-Benet, a., & Bakker, M. M. (2011). Natural and anthropogenic controls on soil erosion in the Internal Betic Cordillera (southeast Spain). *Catena*, 87(2), 190–200. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2011.05.022>
- Bhandari, K., Kumar, A., & Singh, G. K. (2012). Feature Extraction using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): A Case Study of Jabalpur City. *Procedia Technology*, 6, 612–621. <http://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.10.074>
- Blagodatskaya, E., & Kuzyakov, Y. (2013). Active microorganisms in soil: Critical review of estimation criteria and approaches. *Soil Biology and Biochemistry*, 67, 192–211. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.08.024>
- Bronk, D. a., & Steinberg, D. K. (2008). *Nitrogen Regeneration. Nitrogen in the Marine Environment*. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-372522-6.00008-6>
- Burke, D. J., Smemo, K. A., López-gutiérrez, J. C., & Deforest, J. L. (2012). Soil Biology & Biochemistry Soil fungi influence the distribution of microbial functional groups that mediate forest greenhouse gas emissions. *Soil Biology and Biochemistry*, 53, 112–119. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.05.008>
- Burns, R. G., DeForest, J. L., Marxsen, J., Sinsabaugh, R. L., Stromberger, M. E., Wallenstein, M. D., ... Zoppini, A. (2013). Soil enzymes in a changing environment:

- Current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*, 58, 216–234. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Caldwell, B. a. (2005). Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. *Pedobiologia*, 49(6), 637–644. <http://doi.org/10.1016/j.pedobi.2005.06.003>
- CAM. (2006a). Formulación Del Plan De Manejo Y Declaratoria Como Área Natural Protegida Del Desierto De La Tatacoa” Caracterización Del Área Del Desierto De La Tatacoa. In *Formulación Del Plan De Manejo Y Declaratoria Como Área Natural Protegida Del Desierto De La Tatacoa* (p. 274). Neiva, Huila: Convenio Interadministrativo No 1071-200 de 2005, Gobernación del Huila- CAM-USCO.
- CAM. (2006b). Marco Conceptual , Metodológico , Legal Y Contexto Geográfico Del Desierto De La Tatacoa. In *Formulación Del Plan De Manejo Y Declaratoria Como Área Natural Protegida* (Vol. I, p. 113). Neiva: Convenio Interadministrativo No 1071-200 de 2005, Gobernación del Huila- CAM-USCO.
- CAM. (2006c). Plan De Manejo Y Propuesta Para La Declaratoria Del Desierto De La Tatacoa Como Distrito De Manejo Integrado De Los Recursos Naturales Renovables. In Universidad Surcolombiana (Ed.), *Formulación Del Plan De Manejo Y Declaratoria Como Área Natural Protegida Del Desierto La Tatacoa* (Vol. III, p. 138). Neiva, Huila: Convenio Interadministrativo No 1071-200 de 2005, Gobernación del Huila- CAM-USCO.
- CAM. (2008). *Acuerdo 017* (Vol. 2008). Neiva, Huila.
- CAM. (2009). *Capítulo 2: Síntesis Ambiental. Corporación Auntonoma Regional Del Alto Magdalena*. Neiva, Huila.
- Capderou, M. (2003). *Satellites Orbits and mission*. Paris: Pronger-Verlag.
- Cookson, W. R., Osman, M., Marschner, P., Abaye, D. a., Clark, I., Murphy, D. V., ... Watson, C. a. (2007). Controls on soil nitrogen cycling and microbial community composition across land use and incubation temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(3), 744–756. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.09.022>
- Costello, C., & Ward, M. (2006). Search, bioprospecting and biodiversity conservation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 52(3), 615–626. <http://doi.org/10.1016/j.jeem.2006.04.001>

- Dandan, Z., & Zhiwei, Z. (2007). Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the hot-dry valley of the Jinsha River, southwest China. *Applied Soil Ecology*, 37(1–2), 118–128. <http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.06.003>
- Daynes, C. N., Zhang, N., Saleeba, J. a., & McGee, P. a. (2012). Soil aggregates formed in vitro by saprotrophic Trichocomaceae have transient water-stability. *Soil Biology and Biochemistry*, 48, 151–161. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.01.010>
- Dembitsky, V. M., & Rezanka, T. (2005). Metabolites produced by nitrogen-fixing Nostoc species. *Folia Microbiologica*, 50(5), 363–91. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16475497>
- Dighton, J. (2003). *Fungi in Ecosystem Processes*. (J. Bennett, Ed.). Marcel Dekker, Inc. <http://doi.org/10.1201/9780203911440>
- Dodd, N. E. (1948). Las Reservas Forestales del Mundo. *Unasyuva*, 2(4).
- Dosanjh, N. S., & Kaur, J. (2002). Biochemical analysis of a native and proteolytic fragment of a high-molecular-weight thermostable lipase from a mesophilic Bacillus sp. *Protein Expression and Purification*, 24(1), 71–5. <http://doi.org/10.1006/prep.2001.1528>
- FAO. (2004). *Ano internacional del arroz 2004: el arroz es vida*. Roma. Retrieved from <http://www.fao.org/rice2004/es/f-sheet/hoja1.pdf>
- Frioni, L. (1999). *Procesos microbianos*. (Editorial de la Fundación Nacional de Río Cuarto, Ed.). Río Cuarto - Argentina.
- Giacometti, C., Demyan, M. S., Cavani, L., Marzadori, C., Ciavatta, C., & Kandeler, E. (2013). Chemical and microbiological soil quality indicators and their potential to differentiate fertilization regimes in temperate agroecosystems. *Applied Soil Ecology*, 64, 32–48. <http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.10.002>
- Giordano, M. (2009). Global Groundwater? Issues and Solutions. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 155–178. <http://doi.org/10.1146/annurev.environ.030308.100251>
- Gobernación del Huila. (2014). Actividad Económica del Departamento, Departamento del Huila. Retrieved from http://www.huila.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=17736&Itemid=3578
- González-Félix, M. L., Gómez-Jiménez, S., Pérez-Velázquez, M., Davis, D. A., & Velasco-Rameños, J. G. (2007). Nitrogen budget for a low salinity, zero-water exchange culture system: I. Effect of dietary protein level on the performance of

- Litopenaeus vannamei (Boone). *Aquaculture Research*, 38(8), 798–808.
<http://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01657.x>
- Gonzalez, A., Perdomo, Y., & Flores, F. (2010). *El Huila, modelo de aprovechamiento de la región en políticas de adecuación de tierras de irrigación*. Neiva, Huila. Retrieved from [http://www.huila.gov.co/documentos/agricultura/DISTRITOS DE RIEGO/CAP 9 RIEGO.pdf](http://www.huila.gov.co/documentos/agricultura/DISTRITOS_DE_RIEGO/CAP_9_RIEGO.pdf)
- Grinhut, T., Hadar, Y., & Chen, Y. (2007). Degradation and transformation of humic substances by saprotrophic fungi: processes and mechanisms, 21, 179–189.
<http://doi.org/10.1016/j.fbr.2007.09.003>
- Gross, a. (2003). Soil nitrifying enrichments as biofilter starters in intensive recirculating saline water aquaculture. *Aquaculture*, 223(1–4), 51–62.
[http://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00067-X](http://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00067-X)
- Gupta, V. V. S. R., & Germida, J. J. (2014). Soil Biology & Biochemistry Soil aggregation: Influence on microbial biomass and implications for biological processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 1–7.
<http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.09.002>
- Hammer, Ø., & Harper, D. A. T. (2007). *Paleontological Data Analysis. Paleontological Data Analysis*. <http://doi.org/10.1002/9780470750711>
- Hou, H. N. Le, Jussieu, A. L. De, & Montpellier, F.-. (1996). Climate change , drought and desertification. *Journal of Arid Environments*, 34, 133–185.
- Hoyos, N. (2005). Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Catena*, 63(1), 85–108.
<http://doi.org/10.1016/j.catena.2005.05.012>
- Hubalek, Z. (2003). Protectants used in the cryopreservation of microorganisms. *Cryobiology*, 46(3), 205–229. [http://doi.org/10.1016/S0011-2240\(03\)00046-4](http://doi.org/10.1016/S0011-2240(03)00046-4)
- Hynes, H. M., & Germida, J. J. (2012). Relationship between ammonia oxidizing bacteria and bioavailable nitrogen in harvested forest soils of central Alberta. *Soil Biology and Biochemistry*, 46, 18–25. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.10.018>
- ICA. (2017). Resolución No. 00000936. Neiva, Huila: Instituto Colombiano Agropecuario. Retrieved from <http://www.ica.gov.co/getattachment/98b42f32-bad4-4d5d-9458-6dbf47b7c430/2017R936.aspx>
- IGAC. (2014). Intituto Geográfico Agustín Codazzi. Retrieved January 1, 2014, from <http://www.igac.gov.co/>
- Instituto Alexander von Humboldt. (1998). *El Bosque seco Tropical (Bs-T) en Colombia*.

Bogota D.C. Retrieved from <http://media.utp.edu.co/cieblog/archivos/bosque-seco-tropical/el-bosque-seco-tropical-en-colombia.pdf>

Isildak, I., Attar, A., & Erci, F. (2017). A BIOFERTILIZER FORMULATION. Estambul. Retrieved from

<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2017069717&recNum=1&maxRec=&office=&prevFilter=&sortOption=&queryString=&tab=PCT+Biblio>

Izquierdo, I., Caravaca, F., Alguacil, M. M., Hernández, G., & Roldán, a. (2005). Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions. *Applied Soil Ecology*, *30*(1), 3–10. <http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.02.004>

Jannoura, R., Bruns, C., & Joergensen, R. G. (2013). Organic fertilizer effects on pea yield, nutrient uptake, microbial root colonization and soil microbial biomass indices in organic farming systems. *European Journal of Agronomy*, *49*, 32–41. <http://doi.org/10.1016/j.eja.2013.03.002>

Jones, L., Provins, a., Holland, M., Mills, G., Hayes, F., Emmett, B., ... Harper-Simmonds, L. (2014). A review and application of the evidence for nitrogen impacts on ecosystem services. *Ecosystem Services*, *7*, 76–88. <http://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.09.001>

Jouini, M., Lévy, M., Crépon, M., & Thiria, S. (2013). Remote Sensing of Environment Reconstruction of satellite chlorophyll images under heavy cloud coverage using a neural classification method. *Remote Sensing of Environment*, *131*, 232–246. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2012.11.025>

Kassas, M. (1995). Desertification: a general review. *Journal of Arid Environments*, *30*(2), 115–128. [http://doi.org/10.1016/S0140-1963\(05\)80063-1](http://doi.org/10.1016/S0140-1963(05)80063-1)

Keane, R. (2013). *Disturbance Regimes and the Historical Range of Variation in Terrestrial Ecosystems*. (S. Levin, Ed.) *Encyclopedia of Biodiversity* (Academic P, Vol. 2). Amsterdam: Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00389-0>

Kidd, D., Malone, B., Mcbratney, A., Minasny, B., & Webb, M. (2015). Geoderma Regional Operational sampling challenges to digital soil mapping in Tasmania, Australia. *Geoderma Regional*, *4*, 1–10. <http://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.11.002>

Kihara, J., Martius, C., Bationo, A., Thuita, M., Lesueur, D., Herrmann, L., ... Vlek, P. L. G. (2012). Soil aggregation and total diversity of bacteria and fungi in various tillage systems of sub-humid and semi-arid Kenya. *Applied Soil Ecology*, *58*, 12–20.

<http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.03.004>

Kirk, J. L., Beaudette, L. A., Hart, M., Moutoglis, P., Klironomos, J. N., Lee, H., & Trevors, J. T. (2004). Methods of studying soil microbial diversity. *Journal of Microbiological Methods*, 58(2), 169–188.

<http://doi.org/10.1016/j.mimet.2004.04.006>

Koné, S. B., Dionne, A., Tweddell, R. J., Antoun, H., & Avis, T. J. (2010). Suppressive effect of non-aerated compost teas on foliar fungal pathogens of tomato. *Biological Control*, 52(2), 167–173. <http://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.10.018>

Kuzyakov, Y., & Blagodatskaya, E. (2015). Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review. *Soil Biology and Biochemistry*, 83, 184–199. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.01.025>

Landesman, W. J., Nelson, D. M., & Fitzpatrick, M. C. (2014). Soil Biology & Biochemistry Soil properties and tree species drive β -diversity of soil bacterial communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 76, 201–209. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.05.025>

Landsatlook. (2014). Busqueda de imagenes satelitales. Retrieved from <http://landsatlook.usgs.gov>

Leckie, S. E. (2005). Methods of microbial community profiling and their application to forest soils. *Forest Ecology and Management*, 220, 88–106. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.007>

Lee, C.-H., Wu, M.-Y., Asio, V. B., & Chen, Z.-S. (2006). Using a Soil Quality Index To Assess the Effects of Applying Swine Manure Compost on Soil Quality Under a Crop Rotation System in Taiwan. *Soil Science*, 171(3), 210–222. <http://doi.org/10.1097/01.ss.0000199700.78956.8c>

Levy-Booth, D. J., Prescott, C. E., & Grayston, S. J. (2014). Microbial functional genes involved in nitrogen fixation, nitrification and denitrification in forest ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 75, 11–25. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.021>

Li, F., Liu, M., Li, Z., Jiang, C., Han, F., & Che, Y. (2013). Changes in soil microbial biomass and functional diversity with a nitrogen gradient in soil columns. *Applied Soil Ecology*, 64(2), 1–6. <http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.10.006>

Longo, S., Nouhra, E., Goto, B. T., Berbara, R. L., & Urcelay, C. (2014). Effects of fire on arbuscular mycorrhizal fungi in the Mountain Chaco Forest. *Forest Ecology and Management*, 315, 86–94. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.027>

- Loreau, M. (2001). Microbial diversity, producer-decomposer interactions and ecosystem processes: a theoretical model. *Proceedings. Biological Sciences / The Royal Society*, 268(1464), 303–309. <http://doi.org/10.1098/rspb.2000.1366>
- Maa??, S., Caruso, T., & Rillig, M. C. (2015). Functional role of microarthropods in soil aggregation. *Pedobiologia*, 58(2–3), 59–63. <http://doi.org/10.1016/j.pedobi.2015.03.001>
- Macias, M. (Secretario de A. (2011). *Programa: Productividad y Competitividad: Bien por el Campo. Secretaria de Agricultura y Minería - Gobernación del Huila*. Neiva, Huila.
- Martin, J. (1950). Use of acid, Rose Bengal and streptomycin in the plate method for estimating soil fungi. *Soil Science*, 69(3), 215–232.
- Martinezmena, M., Lopez, J., Almagro, M., Boixfayos, C., & Albaladejo, J. (2008). Effect of water erosion and cultivation on the soil carbon stock in a semiarid area of South-East Spain. *Soil and Tillage Research*, 99(1), 119–129. <http://doi.org/10.1016/j.still.2008.01.009>
- Mazon, M., Piedecausa, M., Hernandez, M., & Garcíagarcía, B. (2007). Evaluation of environmental nitrogen and phosphorus contributions as a result of intensive on-growing of common octopus (*Octopus vulgaris*). *Aquaculture*, 266(1–4), 226–235. <http://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.01.001>
- Mcroberts, R. E. (2011). Remote Sensing of Environment Satellite image-based maps : Scientific inference or pretty pictures ? *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 715–724. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.013>
- Miller, K. J., & Wood, J. M. (1996). Osmoadaptation by rhizosphere bacteria. *Annual Review of Microbiology*, 50, 101–36. <http://doi.org/10.1146/annurev.micro.50.1.101>
- Miller, R. F., Chambers, J. C., Pyke, D. A., Pierson, F. B., & Williams, J. (2013). *A Review of Fire Effects on Vegetation and Soils in the Great Basin Region: Response and Ecological Site Characteristics*. USA: United States Department of Agriculture.
- MInAmbiente. (2007). *Plan de Manejo Parque Nacional Natural*. Popayan. Retrieved from <http://www.parquesnacionales.gov.co/PNN/portel/libreria/pdf/EjecutivoPMPNNNevas2008.pdf>
- MinCIT. (2013). Departamento de Huila. *Oficina de Estudios Económicos, Ministerio de Comercio, Industria Y Turismo*, 30.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Plan Nacional de Restauración: restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas destruidas*. Bogotá D.C: Colombia.
- Montgomery, R. (2004). Development of biobased products. *Bioresource Technology*, 91, 1–29. [http://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00154-8](http://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00154-8)
- Munson, S. M., Lauenroth, W. K., & Burke, I. C. (2012). Soil carbon and nitrogen recovery on semiarid Conservation Reserve Program lands. *Journal of Arid Environments*, 79, 25–31. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.11.027>
- NOAA. (2014). Modelos de elevación digital. Retrieved from <http://www.ngdc.noaa.gov/dem/squareCellGrid>
- NTC. (2011). Bioinsumos Para Uso Agrícola. Inoculantes Biológicos. *Normas Técnicas Colombianas*, 349/07.
- Offre, P., Spang, A., & Schleper, C. (2013). Archaea in biogeochemical cycles. *Annual Review of Microbiology*, 67, 437–57. <http://doi.org/10.1146/annurev-micro-092412-155614>
- Oldeman, L., Hakkeling, R., & Sombrock, W. (1991). *World Map of The Status of Human Induced Soil Degradation*. Wageningen, Netherlands: United Nations Environmental Programme. Retrieved from <http://www.isric.org/isric/webdocs/docs/ExplanNote.pdf>
- Oliveira, L. G., Cavalcanti, M. a Q., Fernandes, M. J. S., & Lima, D. M. M. (2013). Diversity of filamentous fungi isolated from the soil in the semiarid area, Pernambuco, Brazil. *Journal of Arid Environments*, 95, 49–54. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.03.007>
- Orduz, S. (2014). *Herramientas para manejo de suelos: desde el espacio hasta el subsuelo*. (Sílabo editores SAS, Ed.) (1st ed.). Campoalegre (Huila): Centro de Formación Agroindustrial La Angostura, Servicio Nacional de Aprendizaje – Sistema de Investigación, desarrollo e Innovación SENNOVA.
- Otero, J. D., Figueroa, a., Muñoz, F. a., & Peña, M. R. (2011). Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro-ecosystems within an Andean paramo area. *Ecological Engineering*, 37(12), 2035–2043. <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.001>
- Pardini, G., & Gispert, M. (2006). Impact of land abandonment on water erosion in soils of the Eastern Iberian Peninsula. *Agrochimica*, 50, 13–24.
- Parsons, A. J., Thornley, J. H. M., Newton, P. C. D., Rasmussen, S., & Rowarth, J. S.

- (2013). Science of the Total Environment Soil carbon dynamics : The effects of nitrogen input , intake demand and off-take by animals. *Science of the Total Environment*, 465, 205–215. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.019>
- Pourreza, M., Hosseini, S. M., Safari Sinangani, A. A., Matinizadeh, M., & Dick, W. A. (2014). Soil microbial activity in response to fire severity in Zagros oak (*Quercus brantii* Lindl.) forests, Iran, after one year. *Geoderma*, 213, 95–102. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.024>
- Power, A. (2013). Ecology of Agriculture. *Encyclopedia of Biodiversity*, 3, 608–625. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00403-2>
- QGIS Development Team. (2015). QGIS Geographic Information System. *Open Source Geospatial Foundation Project*. <http://doi.org/http://www.qgis.org/>
- Rahman, M. R., Shi, Z. H., & Chongfa, C. (2009). Soil erosion hazard evaluation-An integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. *Ecological Modelling*, 220, 1724–1734. <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.04.004>
- Rashid, M. I., Mujawar, L. H., Shahzad, T., Almeelbi, T., Ismail, I. M. I., & Oves, M. (2016). Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. *Microbiological Research*, 183, 26–41. <http://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.007>
- Rattanabumrung, O., Sangadkit, V., Supanivatin, P., & Thipayarat, A. (2012). Kinetics of E.coli colony area expansion and color development in Chromocult?? Coliform Agar (CCA) under different incubation conditions. In *Procedia Engineering* (Vol. 32, pp. 134–140). <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1247>
- Reyers, B. (2013a). *Conserving biodiversity outside protected areas*. *Encyclopedia of Biodiversity* (Vol. 2). Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00359-2>
- Reyers, B. (2013b). Conserving biodiversity outside protected areas. *Encyclopedia of Biodiversity*, 2(1994), 289–305. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00359-2>
- Rodríguez, M., Oria-de-Rueda, J., & Martín-Pinto, P. (2013). Post-fire fungal succession in a Mediterranean ecosystem dominated by *Cistus ladanifer* L. *Forest Ecology and Management*, 289, 48–57. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.009>
- Rosario, M., Fajardo, Z., Barrios, L. F., & Camargo, J. (2003). *Desertificación y Sequía*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorias. Republica de Colombia. Bogota, Colombia.

- Rosell, C. M., & Gómez, M. (2006). Rice. In *Bakery Products* (pp. 123–134). <http://doi.org/10.1002/9780470277553.ch6>
- Rubio, L. M., & Ludden, P. W. (2008). Biosynthesis of the iron-molybdenum cofactor of nitrogenase. *Annual Review of Microbiology*, 62, 93–111. <http://doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.162737>
- Sammouda, R., Adgaba, N., Touir, A., & Al-ghamdi, A. (2014). Computers in Human Behavior Agriculture satellite image segmentation using a modified artificial Hopfield neural network. *Computers in Human Behavior*, 30, 436–441. <http://doi.org/10.1016/j.chb.2013.06.025>
- SCOPUS. (2017). SCOPUS. Retrieved from www.scopus.com
- Seddaiu, G., Porcu, G., Ledda, L., Roggero, P. P., Agnelli, A., & Corti, G. (2013). Soil organic matter content and composition as influenced by soil management in a semi-arid Mediterranean agro-silvo-pastoral system. In *Agriculture, Ecosystems & Environment* (Vol. 167, pp. 1–11). Elsevier B.V. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2013.01.002>
- Shakesby, R. a. (2011). Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews*, 105(3–4), 71–100. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.001>
- Shukla, M. K., Lal, R., & Ebinger, M. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*, 87(2), 194–204. <http://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.011>
- Smith, A. P., Marín-spiotta, E., Graaff, M. A. De, & Balser, T. C. (2014). Soil Biology & Biochemistry Microbial community structure varies across soil organic matter aggregate pools during tropical land cover change. *Soil Biology and Biochemistry*, 77, 292–303. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.05.030>
- Stanturf, J. A., Palik, B. J., & Dumroese, R. K. (2014). Forest Ecology and Management Contemporary forest restoration : A review emphasizing function. *Forest Ecology and Management*, 331, 292–323. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.029>
- Stumpf, A., Malet, J., Allemand, P., & Ulrich, P. (2014). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Surface reconstruction and landslide displacement measurements with Pléiades satellite images. *ISPRS*, 95, 1–12. <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.05.008>
- Svoray, T., & Atkinson, P. M. (2013). Geoinformatics and water-erosion processes. *Geomorphology*, 183, 1–4. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.10.001>

- Tafur, R., Toro, C., Parra, M., Torrente, W., Cuellar, A., & Hernando, J. (2006). *Plan Frutícola Nacional Desarrollo de la Fruticultura en el Huila*.
- Tisdall, J. M., Nelson, S. E., Wilkinson, K. G., Smith, S. E., & McKenzie, B. M. (2012). Stabilisation of soil against wind erosion by six saprotrophic fungi. *Soil Biology and Biochemistry*, *50*, 134–141. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.02.035>
- Toro, J., Requena, I., & Zamorano, M. (2010). Environmental impact assessment in Colombia: Critical analysis and proposals for improvement. *Environmental Impact Assessment Review*, *30*(4), 247–261. <http://doi.org/10.1016/j.eiar.2009.09.001>
- Torsvik, V., & Øvreås, L. (2002). Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems. *Current Opinion in Microbiology*, *5*, 240–245.
- Trasar-Cepeda, C., Leirós, M. C., & Gil-Sotres, F. (2008). Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*, *40*(9), 2146–2155. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.03.015>
- Trivedi, P., Anderson, I. C., & Singh, B. K. (2013). Microbial modulators of soil carbon storage : integrating genomic and metabolic knowledge for global prediction. *Trends in Microbiology*, *21*(12), 641–651. <http://doi.org/10.1016/j.tim.2013.09.005>
- Universidad del Rosario, & Gobernación del Huila. (2015). *Cuenta regresiva hacia los Objetivos de Desarrollo del Milenio 2015 : Municipio de Villavieja*. Neiva, Huila. Retrieved from https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEWjr0Jzk8OLTAhWG3SYKHQM3AAkQFgggtMAE&url=http%3A%2F%2Fhuila.gov.co%2Fimages%2Fstories%2Fodm%2FVILLAVIEJA.pdf&usq=A FQjCNHSHQusYaw_ts8pUEssTRdIdMW_w&sig2=JYQd_-3Peibi71u
- Valdivia-Silva, J. E., Navarro-González, R., Fletcher, L., Perez-Montaño, S., Condori-Apaza, R., & McKay, C. P. (2012). Soil carbon distribution and site characteristics in hyper-arid soils of the Atacama Desert: A site with Mars-like soils. *Advances in Space Research*, *50*(1), 108–122. <http://doi.org/10.1016/j.asr.2012.03.003>
- van Eekeren, N., de Boer, H., Hanegraaf, M., Bokhorst, J., Nierop, D., Bloem, J., ... Brussaard, L. (2010). Ecosystem services in grassland associated with biotic and abiotic soil parameters. *Soil Biology and Biochemistry*, *42*(9), 1491–1504. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.05.016>
- Verin, a D., Cooke, C., Herenyiova, M., Patterson, C. E., & Garcia, J. G. (1998). Role of Ca²⁺/calmodulin-dependent phosphatase 2B in thrombin-induced endothelial cell

- contractile responses. *The American Journal of Physiology*, 275(4 Pt 1), L788-99. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9755112>
- Villalva, R., & Osorio, F. (2007). *Conpes Norte Del Huila - Sur Del Tolima, Estrategia Del Gobierno Nacional Para Apoyar El Desarrollo Integral Del Norte Del Huila - Sur Del Tolima*. Consejo Nacional de Política Económica y Social. Neiva, Huila.
- Vrieling, A., de Jong, S. M., Sterk, G., & Rodrigues, S. C. (2008). Timing of erosion and satellite data: A multi-resolution approach to soil erosion risk mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10, 267–281. <http://doi.org/10.1016/j.jag.2007.10.009>
- Wang, J. X., Wen, J., & Zhang, F. (2011). Investigate research of soil erosion base on IKONOS and landsat images in Jinning. *Procedia Engineering*, 15, 1345–1349. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.249>
- Wang, P., Shu, B., Wang, Y., Zhang, D. J., Liu, J. F., & Xia, R. X. (2013). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in red tangerine (*Citrus reticulata* Blanco) rootstock rhizospheric soils from hillside citrus orchards. *Pedobiologia*, 56(3), 161–167. <http://doi.org/10.1016/j.pedobi.2013.03.006>
- WIPO. (2017). World Intellectual Property Organization. Retrieved from <http://www.wipo.int/portal/en/index.html>
- Wood, S. A., Karp, D. S., DeClerck, F., Kremen, C., Naeem, S., & Palm, C. A. (2015). Functional traits in agriculture: Agrobiodiversity and ecosystem services. *Trends in Ecology and Evolution*, 30(9), 531–539. <http://doi.org/10.1016/j.tree.2015.06.013>
- Zhang, C., & Kong, F. (2014). Isolation and identification of potassium-solubilizing bacteria from tobacco rhizospheric soil and their effect on tobacco plants. *Applied Soil Ecology*, 82, 18–25. <http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.05.002>
- Zhang, X., Wu, B., Ling, F., Zeng, Y., Yan, N., & Yuan, C. (2010). Identification of priority areas for controlling soil erosion. *Catena*, 83(1), 76–86. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2010.06.012>
- Zuazo, V. H. D., & Pleguezuelo, C. R. R. (2009). Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: A review. In *Sustainable Agriculture* (pp. 785–811). http://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_48

11. Anexos.

11.1. PERMANOVA análisis parámetros químicos y físicos evaluados en el suelo

Permutational MANOVA

Resemblance worksheet

Name: Resem3

Data type: Distance

Selection: All

Resemblance: D1 Euclidean distance

Sums of squares type: Type III (partial)

Fixed effects sum to zero for mixed terms

Permutation method: Permutation of residuals under a reduced model

Number of permutations: 9999

Factors

Name	Abbrev.	Type	Levels
Analisis	An	Fixed	6
Zona	Zo	Fixed	2

PAIR-WISE TESTS

Term 'AnxZo' for pairs of levels of factor 'Zona'

Within level 'Carbono total' of factor 'Analisis'

Groups	t	P(perm)	Unique perms	P(MC)
Desertificada, No desertificada	3,9053	0,0017	9356	0,0008

Denominators

Groups	Denominator	Den.df
Desertificada, No desertificada	1*Res	18

Average Distance between/within groups

	Desertificada	No desertificada
Desertificada	1,6317	

No desertificada 2,9184 1,9067

Within level 'Humedad gravimetrica' of factor 'Análisis'

Groups	t	P(perm)	Unique perms	P(MC)
Desertificada, No desertificada	0,91302	0,3698	9275	0,3732

Denominators

Groups	Denominator	Den.df
Desertificada, No desertificada	1*Res	18

Average Distance between/within groups

	Desertificada	No desertificada
Desertificada	1,2396	
No desertificada	1,4379	1,7342

Within level 'CE' of factor 'Análisis'

Groups	t	P(perm)	Unique perms	P(MC)
Desertificada, No desertificada	0,24554	0,8138	5609	0,8054

Denominators

Groups	Denominator	Den.df
Desertificada, No desertificada	1*Res	18

Average Distance between/within groups

	Desertificada	No desertificada
Desertificada	116,01	
No desertificada	124,82	150,7

Within level 'pH' of factor 'Análisis'

Groups	t	P(perm)	Unique perms	P(MC)
Desertificada, No desertificada	2,3082	0,0321	1866	0,036

Denominators

Groups	Denominator	Den.df
Desertificada, No desertificada	1*Res	18

Average Distance between/within groups

	Desertificada	No desertificada
Desertificada	0,35893	
No desertificada	0,81287	0,78474

Within level 'Temp. del suelo' of factor 'Análisis'

Groups	t	P(perm)	Unique perms	P(MC)
Desertificada, No desertificada	2,2964	0,0456	18	0,0337

Denominators

Groups	Denominator	Den.df
--------	-------------	--------

Desertificada, No desertificada 1*Res 18

Average Distance between/within groups

	Desertificada	No desertificada
Desertificada	2,6	
No desertificada	3	2,3778

Within level 'Densidad aparente of factor 'Análisis'

Groups	t	P(perm)	Unique perms	P(MC)
Desertificada, No desertificada	0,30548	0,7674	8268	0,7618

Denominators

Groups	Denominator	Den.df
Desertificada, No desertificada	1*Res	18

Average Distance between/within groups

	Desertificada	No desertificada
Desertificada	0,15148	
No desertificada	0,20998	0,27077

11.2. PERMANOVA comparación de densidad de comunidades funcionales evaluadas en suelo.

Permutational MANOVA

Resemblance worksheet

Name: Resem5

Data type: Similarity

Selection: All

Transform: Log(X+1)

Resemblance: S17 Bray-Curtis similarity (+d)

Sums of squares type: Type III (partial)

Fixed effects sum to zero for mixed terms

Permutation method: Permutation of residuals under a reduced model

Number of permutations: 9999

Factors

Name	Abbrev.	Type	Levels
Análisis	An	Fixed	4
Zona	Zo	Fixed	2

PERMANOVA table of results

Source	df	SS	MS	Pseudo-F	P(perm)	Unique perms	P(MC)
An	3	50247	16749	112,94	0,0001	9954	0,0001
Zo	1	2371,7	2371,7	15,992	0,0001	9964	0,0001
AnxZo	3	7567,6	2522,5	17,009	0,0001	9946	0,0001

Res	72	10678	148,3
Total	79	70864	

Details of the expected mean squares (EMS) for the model

Source	EMS
An	$1 \cdot V(\text{Res}) + 20 \cdot S(\text{An})$
Zo	$1 \cdot V(\text{Res}) + 40 \cdot S(\text{Zo})$
AnxZo	$1 \cdot V(\text{Res}) + 10 \cdot S(\text{AnxZo})$
Res	$1 \cdot V(\text{Res})$

Construction of Pseudo-F ratio(s) from mean squares

Source	Numerator	Denominator	Num.df	Den.df
An	$1 \cdot \text{An}$	$1 \cdot \text{Res}$	3	72
Zo	$1 \cdot \text{Zo}$	$1 \cdot \text{Res}$	1	72
AnxZo	$1 \cdot \text{AnxZo}$	$1 \cdot \text{Res}$	3	72

Estimates of components of variation

Source	Estimate	Sq.root
S(An)	830,03	28,81
S(Zo)	55,585	7,4556
S(AnxZo)	237,42	15,408
V(Res)	148,3	12,178

11.3 PERMANOVA – post hoc comparación de densidad de comunidades funcionales evaluadas en suelos desertificados

ERMANOVA

Permutational MANOVA

Resemblance worksheet

Name: Resem3

Data type: Similarity

Selection: All

Transform: Log(X+1)

Resemblance: S17 Bray-Curtis similarity (+d)

Sums of squares type: Type III (partial)

Fixed effects sum to zero for mixed terms

Permutation method: Permutation of residuals under a reduced model

Number of permutations: 9999

Factors

Name	Abbrev.	Type	Levels
Analisis	An	Fixed	4
Zona	Zo	Fixed	1

PAIR-WISE TESTS

Term 'AnxZo' for pairs of levels of factor 'Analisis'

Within level 'Desertificada' of factor 'Zona'

Groups	Unique t	P(perm)
Heterotrofos totales, Fijadores de nitrogeno libre 8773	9,0762 0,0001	0,0001
Heterotrofos totales, Hongos totales 9144	0,21456 0,8602	0,8622
Heterotrofos totales, Luminiscentes 736	24,041 0,0001	0,0001
Fijadores de nitrogeno libre, Hongos totales 9169	8,493 0,0001	0,0001
Fijadores de nitrogeno libre, Luminiscentes 745	20,145 0,0001	0,0001
Hongos totales, Luminiscentes 986	22,603 0,0001	0,0001

Denominators

Groups	Denominator	Den.df
Heterotrofos totales, Fijadores de nitrogeno libre	1*Res	18
Heterotrofos totales, Hongos totales	1*Res	18
Heterotrofos totales, Luminiscentes	1*Res	18
Fijadores de nitrogeno libre, Hongos totales	1*Res	18
Fijadores de nitrogeno libre, Luminiscentes	1*Res	18
Hongos totales, Luminiscentes	1*Res	18

Average Similarity between/within groups

libre	Heterotrofos totales Hongos totales	Fijadores de nitrogeno Luminiscentes
Heterotrofos totales	93,133	
Fijadores de nitrogeno libre	75,378	92,82
Hongos totales	93,004	74,842
Luminiscentes	22,679	34,921

11.4 PERMANOVA – post hoc comparación de densidad de comunidades funcionales evaluadas en suelo no desertificado

PERMANOVA

Permutational MANOVA

Resemblance worksheet

Name: Resem4

Data type: Similarity

Selection: All

Transform: Log(X+1)

Resemblance: S17 Bray-Curtis similarity

Sums of squares type: Type III (partial)
 Fixed effects sum to zero for mixed terms
 Permutation method: Permutation of residuals under a reduced model
 Number of permutations: 9999

Factors

Name	Abbrev.	Type	Levels
Zona	Zo	Fixed	1
Analisis	An	Fixed	4

PAIR-WISE TESTS

Term 'An'

Groups	Unique t	P(perm)
perms	P(MC)	
Heterotrofos totales, Fijadores de nitrogeno libre 7476	1,5926 0,1117	0,0239
Heterotrofos totales, Hongos totales 7141	1,4034 0,171	0,007
Heterotrofos totales, Luminiscentes 5457	4,7067 0,0002	0,0001
Fijadores de nitrogeno libre, Hongos totales 9170	9,952 0,0001	0,0001
Fijadores de nitrogeno libre, Luminiscentes 8382	6,8225 0,0001	0,0001
Hongos totales, Luminiscentes 8804	9,1437 0,0001	0,0001

Denominators

Groups	Denominator	Den.df
Heterotrofos totales, Fijadores de nitrogeno libre	1*Res	18
Heterotrofos totales, Hongos totales	1*Res	18
Heterotrofos totales, Luminiscentes	1*Res	18
Fijadores de nitrogeno libre, Hongos totales	1*Res	18
Fijadores de nitrogeno libre, Luminiscentes	1*Res	18
Hongos totales, Luminiscentes	1*Res	18

Average Similarity between/within groups

libre	Heterotrofos totales	Fijadores de nitrogeno
	Hongos totales	Luminiscentes
Heterotrofos totales	80,987	
Fijadores de nitrogeno libre	79,508	94,828
Hongos totales	85,435	79,36
Luminiscentes	46,944	56,02

11.5 Analisis canónica de coordenadas principales entre variables bióticas y abióticas.

CAP

Canonical analysis of principal coordinates

Resemblance worksheet

Name: Resem4

Data type: Distance

Selection: All

Resemblance: S17 Bray-Curtis similarity

Factor for groups: Analysis

Number of samples: 10

Choice of m: 6

CANONICAL ANALYSIS

Correlations

Eigenvalue	Correlation	Corr.Sq.
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	1	1

Canonical coordinate scores

Sample	CAP1	CAP2	CAP3	CAP4	CAP5	CAP6
Heterotrofos totales	0,0948	-0,0286	0,0008	-0,0391	0,5388	0,501
Fijadores de nitrogeno libre	-0,2059	0,092	-0,3645	-0,2137	0,2665	0,1136
Hongos totales	-0,1479	0,379	0,5173	0,2465	-0,0471	-0,1044
Carbono total	-0,5368	0,3921	-0,0476	-0,0323	0,0863	-0,3486
Humedad Gravimetrica	0,2892	0,145	0,2797	0,0255	-0,5216	0,2786
CE	0,4179	-0,102	-0,2665	0,6834	0,1899	-0,3566
pH	0,1331	0,0527	0,0777	-0,046	0,0444	0,3769
Temp. del suelo	-0,4958	-0,735	0,0519	0,1946	-0,2476	0,0925
Densidad aparente	0,1395	0,1258	-0,5763	-0,2542	-0,4785	-0,0581
Altitud	0,3119	-0,3209	0,3275	-0,5646	0,169	-0,4949

DIAGNOSTICS

m	prop.G	ssres	d_1^2	d_2^2	d_3^2	d_4^2	d_5^2	d_6^2	%correct
1	0,6561	9,8802	1	0	0	0	0	0	0
2	0,9185	11,299	1	1	0	0	0	0	0
3	0,976	13,683	1	1	1	0	0	0	0
4	0,9951	15,478	1	1	1	1	0	0	0
5	0,9976	19,55	1	1	1	1	1	0	0
6	0,999	34,738	1	1	1	1	1	1	20

11.6 Cluster de relación entre variables bióticas y abióticas de la zona de estudio

