

Relación entre el efecto de borde y la emisión de CO₂ en dos bosques naturales bajo condiciones ambientales contrastantes

Diego Alexander Prada García, Yomaira Andrea Abril Vargas

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Forestal

Director

Diego Suescún Carvajal

MSc Bosques y Conservación Ambiental

Codirector

Julián Mauricio Botero Londoño

PhD Ciencias Agrarias

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia- IPRED

Programa de Ingeniería Forestal

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado en primer lugar a **Dios** quien me dio la vida y me permitió culminar con esta etapa tan importante, quien me dio fuerzas y mil motivos para seguir adelante.

A mis padres, **Pedro Abril** por ser un padre amoroso, incondicional y querer siempre lo mejor para mi vida, por formarme como persona y por darme educación, y **Gladys Vargas** por ser una madre maravillosa, ayudarme en las etapas de mi vida y brindarme su gran amor; gracias a ustedes porque sin su ayuda no hubiese llegado hasta acá, porque a pesar de los obstáculos siempre estuvieron para mí, los amo y no tendré forma de retribuir todo lo que hicieron.

A la princesa de mi vida, mi hija **Sara Lucía** quien es el motivo para levantarme cada día y ser mejor persona. Quien con sus abrazos y besos me hacía entender que todo se podía lograr, te amo y espero que estés orgullosa de mí.

A mis hermanos **Camilo y Christian** por su apoyo y palabras de aliento en cada circunstancia, porque a pesar de cada adversidad siempre estuvimos para apoyarnos, los amo.

A mi compañero de tesis y de vida **Diego Prada** por estar para mí en todo momento, porque juntos siempre somos un excelente equipo y alcanzamos cualquier meta, me siento afortunada de tenerte.

A mi hijito de cuatro patas **Romeo**, porque su compañía era incondicional todo el tiempo.

A mis tíos (**Pablo y Alirio**), primos más cercanos por ser una voz de aliento en este proceso,
por sus consejos y por estar orgullosos de mí.

Andrea Abril

Este proyecto está dedicado a **Dios** quien me dio fuerzas para seguir adelante y superar cada
obstáculo.

A mis padres, **Fernando Prada**, por ser un padre maravilloso, por ser mi ejemplo de hombre
y de padre a seguir, por querer darme siempre lo mejor, porque con tu esfuerzo y dedicación
lograste darme estudio y convertirme en el primer profesional de la familia y **Sandra García**,
por cada palabra de amor, por cada sonrisa, por cada consejo, por tantas oraciones, por esas
canas que te saque y porque sin duda tengo la mejor mamá del mundo. Gracias porque sin
ustedes nada sería posible.

A mi hija, **Sara Lucía**, por ser el motor de mi alma, que me impulsa a levantarme cada
mañana y cada vez ser mejor hombre, por ser mi felicidad, porque desde que llegaste lo tengo
todo y porque no importa lo difícil que sea ni lo lejos que este, hoy y siempre todo lo haré por ti,
porque te amo y siempre serás el amor de mi vida.

A **Andrea Abril**, porque juntos logramos este sueño, por creer en mí, por ayudarme a ser
cada día mejor, por enseñarme el valor de la lealtad, porque siempre esperas lo mejor de mí y
porque lo eres todo para mí, por enseñarme a soñar y creer que todo es posible.

A mis hermanas **Valentina** y **María Fernanda** y sobrina **Isabella** por llenar mi vida de sonrisas y mensajes de aliento, por escucharme y estar orgullosas de mí, soy afortunado de tenerlas.

A **Pedro** y **Gladys** por brindarme una familia, por acompañarme y ayudarme cuando lo necesitaba, por abrirme las puertas de su familia y convertirme en un integrante más, no tengo como pagar lo mucho que hacen por mí.

Finalmente, dedico este sueño a esos dos angelitos que Dios puso en mi camino hace siete años, don **Néstor** y doña **Sonia** por creer en mí, por confiar y ayudarme a sacar a mi hija adelante, por escucharme y aconsejarme, darme una familia, mi familia “todo menos” porque ni con todo el oro pagaría lo que ustedes hacen por mí.

Diego Prada

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander y sus docentes por el proceso de formación y permitirnos culminar esta meta. En especial a nuestro director, Diego Suescún por acogernos como sus tesisistas, por orientarnos de esa forma tan especial que solo él sabe hacer. Gracias por su compromiso, dedicación y tiempo todas las veces necesarias para hacer de este proyecto lo mejor.

A nuestro codirector Julián Mauricio Botero y la profe Erika Celis por el acompañamiento prestado, la confianza en el laboratorio, y todos sus conocimientos ya que fueron de gran aporte para nuestro proyecto.

A los señores Delfo Uribe y Jairo Jaimes por darnos su confianza, acogida y permitirnos trabajar en sus fincas. De igual manera, a la profesora Judith Macías y Diana Jaimes por conseguir los lugares para llevar a cabo nuestro proyecto.

A nuestras familias, gracias por el apoyo y recursos brindados. A nuestros amigos y compañeros en especial a Camila Cruz y Camilo Abril por la ayuda en campo. Gracias porque sin ustedes no lo hubiésemos logrado.

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Antecedentes	17
3. Marco Referencial.....	20
3.1 Marco Teórico.....	20
3.1.1 Bosque seco tropical	18
3.1.2 Bosque altoandino.....	19
3.1.3 Efecto de borde en las comunidades vegetales	20
3.1.4 Emisión de CO ₂ en bosques naturales	20
3.2 Marco conceptual.....	21
4 Metodología	23
4.1 Área de estudio	23
4.2 Trabajo de campo.....	24

4.2.1 Diseño experimental	24
4.2.2 Toma de muestras de CO ₂	25
4.3 Análisis de laboratorio.	26
4.4 Procesamiento de datos.....	26
4.4.1 Valores medios diarios de concentración de CO ₂ , humedad y temperatura.....	27
4.4.2 Valor promedio diario de concentración de CO ₂ , humedad y temperatura.....	27
4.4.3 Gráficos de dispersión entre las variables de CO ₂ (ppm), temperatura (°C) y humedad relativa (%).	30
4.4.4 Correlación de Pearson	28
4.4.5 Modelos de regresión.....	28
4.4.6 ANAVA	28
5 Resultados	28
5.1 Bosque altoandino.....	28
5.1.1 Valores medios diarios de concentración de CO ₂ , humedad y temperatura.....	29
5.1.2 Valor promedio diario de concentración de CO ₂ , humedad y temperatura.....	31
5.1.3 Gráficos de dispersión entre las variables de CO ₂ (ppm), temperatura (°C) y humedad relativa (%).	32
5.1.4 Correlación de Pearson	34
5.1.5 Modelos de regresión.....	35
5.1.6 Análisis de Varianza (ANAVA) para cada uno de los sitios del bosque altoandino.	35
5.2 Bosque seco tropical	36
5.2.1 Valores medios diarios de concentración de CO ₂ , humedad y temperatura.....	36
5.2.2 Valor promedio diario de concentración de CO ₂ , humedad y temperatura.....	39
5.2.3 Gráficos de dispersión entre las variables de CO ₂ (ppm), temperatura (°C) y humedad relativa (%).	39
5.2.4 Correlación de Pearson	41
5.2.5 Modelos de regresión.....	42
5.2.6 Análisis de Varianza (ANAVA) para que uno de los sitios del bosque seco.	42
5.3 Análisis de Varianza (ANAVA) para la comparación entre ecosistemas.....	43
6 Discusión.....	44
7 Conclusiones	46

8 Recomendaciones	49
Referencias Bibliográficas	48
Apéndices.....	52

Lista de Tablas

Tabla 1. Valor medio por día de concentración de CO ₂ , humedad y temperatura para el interior del bosque altoandino	31
Tabla 2. Valor medio por día de concentración de CO ₂ , humedad y temperatura para el borde del bosque altoandino	32
Tabla 3. Valor medio por día de concentración de CO ₂ , humedad y temperatura para el exterior del bosque altoandino	33
Tabla 4. Valor promedio por día de concentración de CO ₂ , humedad y temperatura del bosque altoandino.....	33
Tabla 5. Coeficientes de correlación de Pearson bosque altoandino	36
Tabla 6. Modelos de regresión para bosque altoandino.....	37
Tabla 7. Valor medio por día de concentración de CO ₂ , humedad y temperatura para el interior del bosque seco tropical	39
Tabla 8. Valor medio por día de concentración de CO ₂ , humedad y temperatura para el borde del bosque seco tropical.....	39
Tabla 9. Valor medio por día de concentración de CO ₂ , humedad y temperatura para el exterior del bosque seco tropical	40
Tabla 10. Valor promedio por día de concentración de CO ₂ , humedad y temperatura del bosque seco tropical	41
Tabla 11. Coeficientes de correlación de Pearson bosque seco tropical.....	43
Tabla 12. Modelos de regresión para bosque seco tropical	44

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa ubicación bosque altoandino	25
Figura 2. Mapa ubicación bosque seco tropical.....	26
Figura 3. Diseño experimental	27
Figura 4. Cromatógrafo de gases	28
Figura 5. Gráfico de dispersión bosque altoandino	35
Figura 6. Prueba de rango múltiple de Duncan para las emisiones de CO ₂ en los diferentes sitios: I (Interior), B (Borde) y E (Exterior). Las letras A y B indican diferencias significativas para bosque altoandino	38
Figura 7. Gráfico de dispersión bosque seco tropical	42
Figura 8. Prueba de rango múltiple de Duncan para las emisiones de CO ₂ en los diferentes sitios: I (Interior), B (Borde) y E (Exterior). La letras A, B y C indican diferencias significativas para bosque seco	45
Figura 9. Prueba de rango múltiple de Duncan para las emisiones de CO ₂ en los diferentes sitios: I (Interior), B (Borde) y E (Exterior) en dos tipos de ecosistema: R (Robledal) y Bs(Bosque seco). Las letras A, B y C indican diferencias significativas.....	46

Lista de Apéndices

Apéndice A. Establecimiento de parcelas.....	54
Apéndice B. Diseño experimental	54
Apéndice C. Instalación de cámaras	55
Apéndice D. Toma de muestras	55
Apéndice E. Cromatógrafo de gases	56
Apéndice F. Procesamiento de muestras	56
Apéndice G. Resultados de cromatógrafo de gases	57

Resumen

Título: Relación entre el efecto de borde y la emisión de CO₂ en dos bosques naturales bajo condiciones ambientales contrastantes¹

Autor: Yomaira Andrea Abril Vargas

Diego Alexander Prada García²

Palabras claves: Cambio climático, Fragmentación del paisaje, Captura de Carbono, bosque altoandino, bosque seco.

Descripción:

El calentamiento global es de los mayores problemas que preocupan en la actualidad, por ello la importancia de conocer los mecanismos que regulan los GEI ya que estos son los principales influenciadores de este cambio. Las proyecciones de cambio climático indican un aumento en la temperatura siendo la principal causa la pérdida de vegetación en los ecosistemas tropicales. Uno de los cambios generados por la deforestación es la presencia de los efectos de borde donde se presentan alteraciones en la estructura y composición de la vegetación. En este trabajo, analizamos la incidencia del efecto de borde en la emisión de CO₂ desde el suelo, temperatura y humedad relativa en dos ecosistemas con características ambientales contrastantes (bosque seco y bosque altoandino). Se midió la emisión de CO₂ durante 10 días a la misma hora, mediante cámaras cerradas, cada muestra se replicó tres veces y se colectó una muestra en el aire. Las muestras fueron procesadas a través de un cromatógrafo de gases. La temperatura y humedad se obtuvo a través de un termohigrómetro y se relacionaron con el interior, borde y exterior del bosque. En general, las variables estudiadas presentaron una relación directa generando patrones de comportamiento y ajuste a modelos de regresión. La mayor concentración de CO₂ se encuentra en el interior del bosque debido a la alta actividad microbiana, mientras que el exterior obtuvo los valores más bajos de emisión. Estos efectos están ligados a la intervención antrópica proporcionando cambios en los servicios de regulación donde se destaca el aumento en la temperatura por cambio climático. Nuestra investigación proporciona información útil para la implementación de estrategias que garanticen la conservación de los bosques tropicales a través de una gestión y planificación ambiental.

¹ Trabajo de Grado

² Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia. IPRED. Programa de Ingeniería Forestal. Director: Suescún Carvajal, Diego. MSc. Bosques y Conservación Ambiental. Codirector: Botero Londoño, Julián Mauricio. PhD Ciencias Agrarias

Abstract

Title: Relation between the edge effect and CO₂ emission in two natural forest under environment conditions contrasting¹

Author: Yomaira Andrea Abril Vargas
Diego Alexander Prada García²

Key words: Climatic change, landscape fragmentation, coil capture, high Andean forest and dry forest

Description:

The global warming is one of the major problems that concern nowadays. That is why the meaning of mechanism that regulate the greenhouse gases (GG) knowledge. Insomuch as these are the main influencers of this change. The projections of climate change indicate an increase in the temperature being the main cause the vegetation lost in the tropical systems. One of the generate changes for the deforestation is the presence of the edge effects where alterations are present in vegetation structure and composition. In this work, we analyze the incidence of the edge effect in the CO₂ emission since the soil, relative temperature and dump in two ecosystems with contrasting ambient characteristics (dry forest and high Andean forest). We measure the CO₂ emission for ten days at the same hour, through closed cameras, each sample was replicated three times and was collected one sample in the air. The samples were processed through a gas chromatograph. We get the temperature and dump through a thermo hygrometer and was relate with the inside, edge and outside of the forest. In general, the studied variables present a direct relation generating behavior patterns and setting to regression models. The major CO₂ concentration was found in the inside of the forest for the high microbial activity, while the outside got the lowest values of emission. These effects are ligated to the anthropic interventions providing changes in the regulation services where the increase stands out in the temperature for climatic change. Our investigation provides information useful for the implementation of strategies that assure the tropical forest conservation through a management and environmental planning.

¹ Bachelor Thesis.

² Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia. IPRED. Programa de Ingeniería Forestal. Director: Suescún Carvajal, Diego. MSc. Bosques y Conservación Ambiental. Codirector: Botero Londoño, Julián Mauricio. PhD Ciencias Agrarias

Introducción

Los bosques naturales tropicales se caracterizan por presentar el mayor número de especies tanto de plantas como de animales, lo que proporciona una gran variedad de bienes y servicios ecosistémicos (Balvanera, 2012). Debido a la expansión de la frontera agrícola y pecuaria, estos ecosistemas están siendo transformados con consecuencias en la fragmentación del hábitat y pérdida de biodiversidad (Etter *et al.*, 2006).

A través de la historia, la deforestación debido a la creciente demanda de productos agrícolas, ganaderos y forestales, ha promovido una tenencia de la tierra que genera cambios en la estructura, composición y función de los ecosistemas naturales, formando un paisaje transformado en un mosaico de coberturas vegetales naturales y artificiales, entre ellas remanentes de bosque (Guariguata y Ostertag, 2002). Lo anterior, influye en los cambios ambientales negativos actuales, como la reducción de la captura de Carbono por parte de los bosques naturales, y un aumento del efecto de borde en los parches de los paisajes fragmentados (Romero y Varela, 2011).

Los bosques naturales tropicales capturan y conservan más Carbono que cualquier otro ecosistema terrestre, ya que tienen la capacidad de asimilar en su estructura el CO₂ e incorporarlo por largos periodos de tiempo, lo que convierte a estos ecosistemas en los sumideros de Carbono más importantes (Ordoñez y Masera, 2001).

Por esta razón, es indispensable conocer el comportamiento de este elemento, particularmente su emisión desde el suelo, en los diferentes sitios del bosque, desde su interior hasta el exterior. Por lo tanto, el presente estudio se enfoca en la cuantificación de la concentración de CO₂ emitido en el suelo de un bosque seco tropical y un bosque altoandino, comparando entre el

interior, el borde y el exterior, además de explorar las relaciones entre la emisión de CO₂ y variables ambientales como la humedad relativa y la temperatura.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la relación entre el efecto de borde y la emisión de CO₂ emitida por el suelo en dos bosques naturales tropicales bajo condiciones ambientales contrastantes de temperatura y humedad relativa.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar la concentración de CO₂ emitida en el suelo de ambos bosques, en tres sitios diferentes (interior, borde, exterior).

Correlacionar la concentración de CO₂ con la humedad relativa y temperatura en cada tipo de bosque y en los tres sitios.

Comparar los resultados obtenidos entre los tres sitios de cada bosque y entre ambos tipos de bosques.

2. Antecedentes

Serran *et al.* en 2017 en su estudio, Respiración de Dióxido de Carbono de suelo, en bosque tropical húmedo – Gamboa, Panamá; evaluaron las variables de CO₂, temperatura, humedad relativa, intensidad lumínica y pendiente del suelo, buscando una correlación entre estas. El CO₂ fue cuantificado utilizando una cámara dinámica cerrada. Los resultados obtenidos en el análisis de regresión lineal para las variables no representan una relación significativa en la emisión del gas.

Oviedo (2007) en su trabajo, Medición de la respiración del suelo en ecosistemas mediterráneos con sistemas de cámaras PPs y analizadores tipo IRGA; realizó una comparación entre los dos instrumentos mencionados, con el fin de conocer cuál de estos es más conveniente. Calculó el flujo de CO₂ y temperatura en distintas especies arbóreas. Al comparar la eficiencia de los dos instrumentos determinó que no existen diferencias significativas entre uno y otro, sin embargo, se proponen modificaciones en la cámara cerrada (PPs) para lograr mayor entrada y salida de aire.

Nava *et al.* (2007) en su investigación, Evaluación del efecto de borde sobre dos especies de bosque tropical caducifolio de Jalisco, México; muestran evidencias de los cambios abióticos causados por el efecto de borde, además midieron las variables de temperatura, radiación fotosintéticamente activa al nivel del suelo y realizaron cálculos de CO₂ en el suelo. Demostraron que los cambios en los factores del ambiente influyen de manera significativa en la supervivencia de especies, así mismo que incide en el cambio de temperatura entre el interior y exterior del bosque modificando variables abióticas tanto de temperatura y humedad, y aumentando las limitaciones ecológicas para la supervivencia de plantas.

3. Marco Referencial

3.1 Marco Teórico

3.1.1 Bosque seco tropical. El bosque seco tropical es toda formación vegetal con una cobertura boscosa distribuida entre 0 y 1000 m.s.n.m, que presenta características edafoclimáticas únicas, donde predominan las temperaturas superiores a 24°C y precipitaciones entre los 700 y 2000 mm anuales (IAVH, 1998). Los bosques secos representan el 50% de las áreas boscosas en Centroamérica y el 22% en Sudamérica (Murphy y Lugo, 1986).

El clima presente en este tipo de ecosistema es cálido-árido, cálido-semiárido y cálido-seco caracterizado porque la evotranspiración media anual supera la precipitación media anual durante el año, con déficit de agua en largos periodos de tiempo (Ramírez *et al.*, 2018).

El bosque seco es considerado una prioridad de conservación a nivel mundial, debido al estado ecológico brindado a unas especies únicas en su ubicación geográfica y también por su localización en zonas con alta presión antrópica (González *et al.*, 2014).

Las especies allí presentes son generalmente caducifolias lo que les permite disminuir las pérdidas de agua por evapotranspiración y así evitar que en las épocas secas se afecte su bienestar. A su vez, las especies del bosque seco presentan espinas y espolones como adaptaciones y desarrollos para protegerse del ataque de animales (Leiva *et al.*, 2009).

El bosque seco se ha destacado por su alta adaptabilidad e incluso es capaz de recuperar su riqueza y diversidad después de cualquier disturbio (Mendoza, 1999), es decir, que tiene la capacidad de sobreponerse y recuperarse luego de cualquier perturbación, por lo que puede regresar a su estado original en cuanto estructura y funcionamiento. Esto se debe a las

características de las especies que este ecosistema alberga, convirtiéndose en un sistema altamente resiliente (Ramírez *et al.*, 2018). Finalmente, la riqueza estructural y funcional de los bosques secos contribuye a la generación de numerosos servicios ambientales, lo que proporciona beneficios a la sociedad y demás seres vivos presentes en el ecosistema (Balvanera, 2012).

3.1.2 Bosque altoandino. El bosque altoandino es reconocido como uno de los principales centros de diversidad en el mundo, debido a su variabilidad geomorfológica altitudinal y alta complejidad de paisajes y clima (León, Vélez y Yepes, 2009). Sin embargo, estos ecosistemas son de los más vulnerables por una elevada pérdida de área. Dentro de estos ecosistemas se destacan los denominados “robleales” (Ospina y Paz, 2012).

Los robleales se caracterizan por estar dominados por la especie *Quercus humboldtii* Bonpl., éstos se encuentran altamente degradados por la fuerte presión antrópica principalmente por la ampliación de la frontera agrícola (León, Vélez y Yepes, 2009). La alta demanda de la madera de roble ha sometido los bosques a un proceso degradante aumentando el ataque de plagas y enfermedades, lo que condiciona el bosque a una fuerte amenaza permanente (Montenegro y Vargas, 2008).

Los robleales se encuentran entre los 750 – 3450 m.s.n.m. distribuidos a lo largo de la cordillera de los Andes con condiciones de alta humedad y precipitaciones mayores a 2000 mm anuales (Kessler y Driesch, 1993). La temperatura y la humedad influyen en la composición y estructura de los robleales, así mismo, estos son dados por la altitud (Avella, Rangel y Solano, 2017).

La importancia de estos bosques se debe a la conservación de la biodiversidad y los bienes y servicios que estos nos proveen (Ospina y Paz, 2012), destacándose la provisión de agua y conservación de hábitats y recursos naturales, además son grandes reguladores del clima debido a la captura de CO₂ (García y Jiménez, 2009).

3.1.3 Efecto de borde en las comunidades vegetales. El efecto de borde es la zona de contacto o transición entre comunidades que difieren en estructura vegetal (Romero y Varela, 2011). Este efecto origina cambios tanto bióticos como abióticos y permite el flujo de materia y energía a través de él, cuyas consecuencias pueden ser negativas para algunas especies (Granados, Serrano y García, 2014). Estos impactos pueden ser medidos por su intensidad y penetración, esta última definida por la instancia máxima que el impacto es capaz de impactar en dirección al centro del bosque (Kattan, 2002).

Los efectos de borde se pueden clasificar de tres clases: efectos abióticos al generar cambios en las condiciones físicas y climáticas (como temperatura y humedad); efecto biológico directo que son todos aquellos cambios en abundancia y diversidad de especie o recursos, y efectos biológicos indirectos que son los cambio en las interacciones entre especies (Peña *et al.*, 2005).

La causa directa de la fragmentación del bosque es la deforestación y la expansión de la frontera agrícola, consiguiendo cambios micro-climáticos, en la estructura y en las condiciones físicas del suelo, estas dadas principalmente por el efecto de borde y la susceptibilidad de los fragmentos del bosque (López y Ramírez, 2004).

3.1.4 Emisión de CO₂ en bosques naturales. El cambio climático es producido por el aumento de CO₂ en la atmosfera, sin embargo, los bosques son aquellos encargados de

absorberlo y mitigar las acciones humanas que generan grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Ordoñez y Masera, 2001). A través de la fotosíntesis las plantas son capaces de absorber el CO₂ utilizándolo para culminar sus procesos metabólicos, por esta razón, los bosques son conocidos como sumideros de carbono capaces de mitigar la emisión de CO₂ capturándolo y almacenándolo por largos periodos de tiempo (Vargas y Yáñez, 2004).

Los ecosistemas naturales concentran alrededor del 30% del CO₂, no obstante, la industrialización y las actividades humanas no han permitido lograr un equilibrio entre la emisión y la captura de CO₂ debido a la fragmentación de los bosques. Las altas tasas de deforestación reducen el crecimiento de los bosques y con ello la captura de CO₂ (Fernández *et al.*, 2017).

La emisión de CO₂ trae consigo implicaciones derivadas en problemas atmosféricos, ausencias de lluvia y escases de alimentos, todo esto dado que se modifica la temperatura (Contreras *et al.*, 2010). Actualmente, existen programas de captura de Carbono con el fin de mitigar y/o compensar los efectos causados por estas emisiones, estos proyectos buscan que todas aquellas personas generadoras de emisiones de CO₂ paguen créditos en proyectos de captura de Carbono (Briceño, Iñiguez y Ravera, 2016).

3.2 Marco conceptual

Biodiversidad: es la variedad de seres vivos, ecosistemas y diferencias genéticas presentes en la Tierra, además su forma de organización y sus diferentes procesos de selección (Dorado, 2010).

Bosque natural: es un área forestal con características y elementos nativos estos presentan especies herbáceas, arbustivas y arbóreas, estos agrupan diversos tipos de vegetación de acuerdo con las características geográficas (FAO, 2012).

Cambio climático: es el aumento de la temperatura media del planeta ocasionado por la emisión de gases de efecto invernadero en la atmosfera, además los procesos de radiación solar, variación de los parámetros orbitales, movimientos de la corteza terrestre y actividad volcánica son algunos de los factores directamente producidos por este (Zamora *et al.*, 2016).

Dióxido de Carbono (CO₂): es un compuesto inorgánico formado por la unión de un átomo de Carbono y dos de Oxígeno, es un gas inerte en condiciones normales producido principalmente por procesos de combustión (Contreras, Luna y Ríos, 2010).

Factores edafo-climáticos: son las características de temperatura, altitud, precipitación y humedad en un ecosistema (IAVH, 1998).

Fragmentación: es el proceso de división de un hábitat originando transformaciones de paisaje, y alterando la abundancia de especies y relaciones ecológicas (Peña *et al.*, 2005).

Gases de efecto invernadero (GEI): son componentes gaseosos de la atmosfera que emiten y absorben radiación, estos son el vapor de agua (H₂O), Dióxido de Carbono (CO₂), Óxido Nitroso (N₂O), Metano (CH₄) y Ozono (O₃) (Benavides y León, 2007).

Servicios ecosistémicos: son aquellos suministros brindados por los ecosistemas que permiten la interacción entre el bienestar humano y el funcionamiento del mismo, estos pueden ser de regulación, de provisión y culturales (Balvanera y Cotler, 2007).

4 Metodología

4.1 Área de estudio

El estudio se realizó en la vereda el Llano municipio de Molagavita, ubicado entre las coordenadas 6°39'65" – 6°39'55" en sentido NS y 72°46'15.68" – 72°46'12.58" en sentido EW a una altitud aproximada de 3100 msnm, para el bosque altoandino (Figura 1).

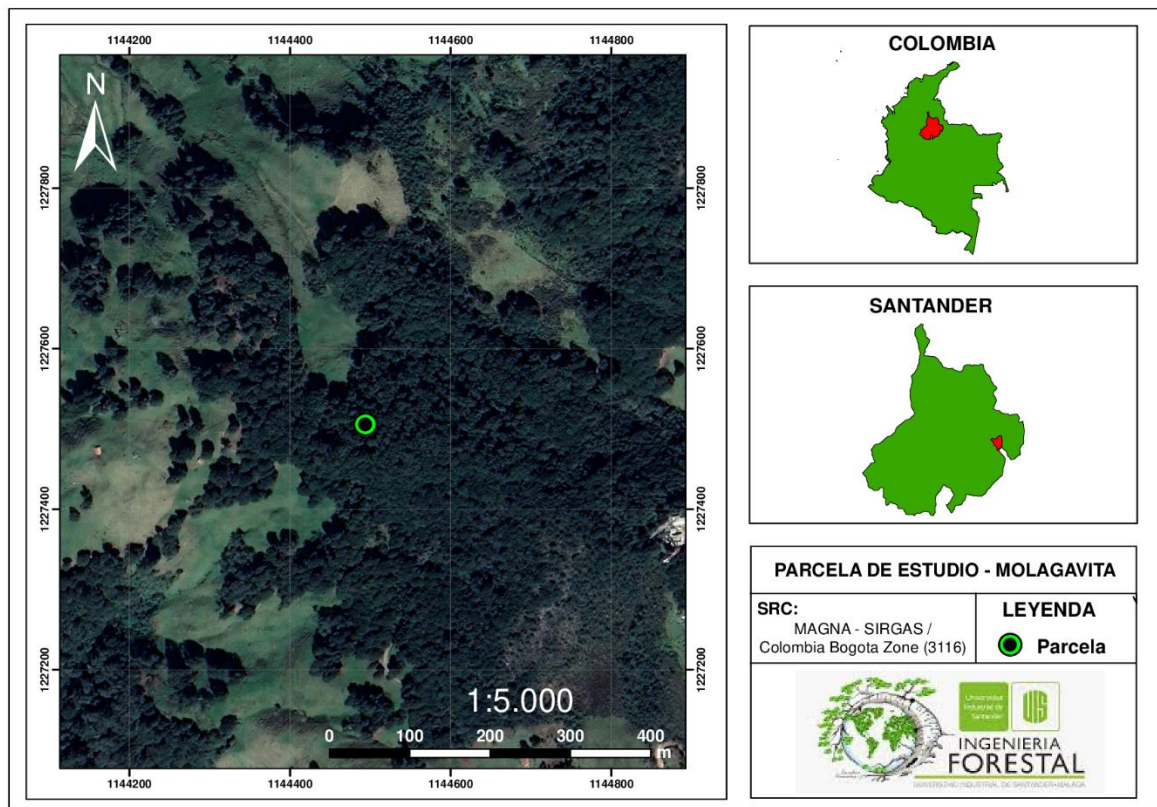


Figura 1. Mapa ubicación bosque altoandino.

El bosque seco se encuentra ubicado en la vereda El Juncal del municipio de Enciso entre las coordenadas 6°36'35.75" – 6°36'34.02" en sentido NS y 72°42'28.46" – 72°42'26.74" en sentido EW con una altitud aproximada de 1200 msnm (Figura 2).

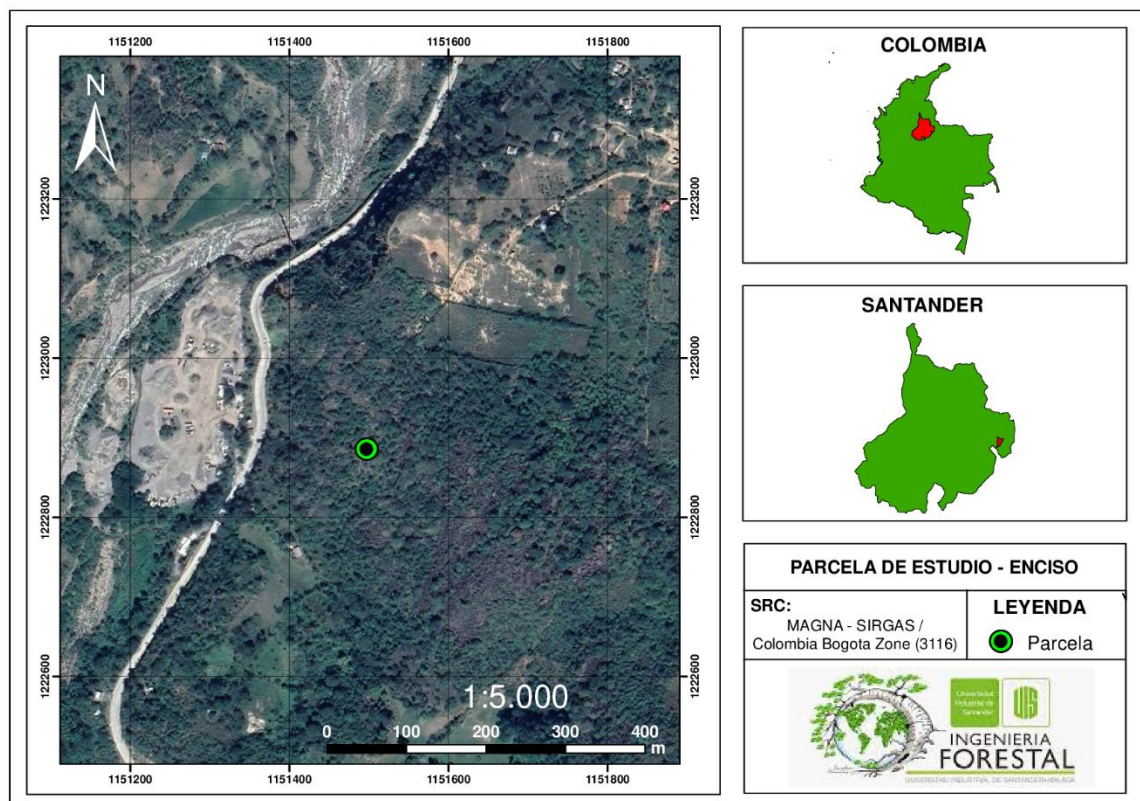


Figura 2. Mapa ubicación bosque seco.

4.2 Trabajo de campo

4.2.1 Diseño experimental. El diseño experimental se llevó a cabo en dos coberturas contrastantes que son el bosque seco tropical y el bosque altoandino. En cada uno de los bosques se establecieron tres sitios diferentes con una ubicación específica, al interior, en el borde y en el exterior del mismo (Figura 3). En cada sitio seleccionado, y para cada bosque, se recolectarán cuatro muestras de CO₂ durante cinco días, de las cuales tres muestras fueron tomadas del suelo y una del aire.

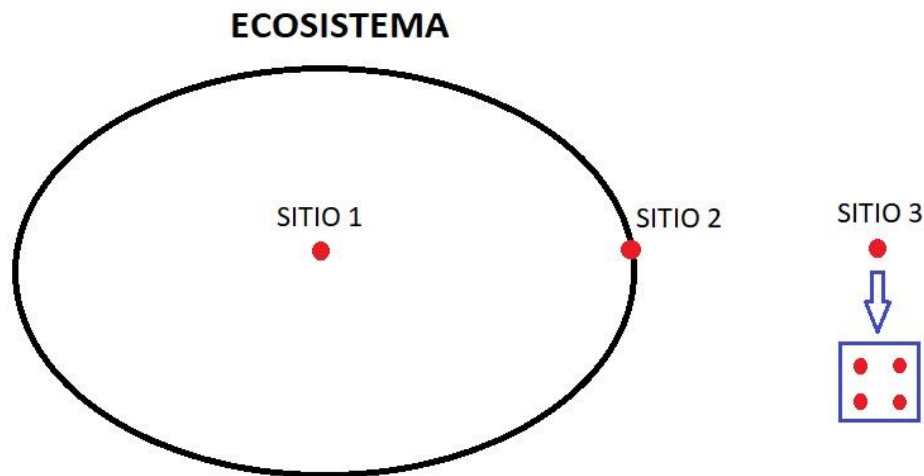


Figura 3. Diseño experimental.

4.2.2 Toma de muestras de CO₂. La toma de datos se realizó instalando tres cámaras de muestreo de gases en cada uno de los sitios establecidos. La cámara cuenta con unas dimensiones de 30 x 15 cm cuya base fue introducida en el suelo para evitar la pérdida de los gases, además, esta posee un agujero en la parte superior para extraer la muestra de gas con una jeringa plástica de alta capacidad. Esta jeringa tiene una válvula de retención de gases para evitar la pérdida de éstos. Cada jeringa fue etiquetada con el sitio, hora y fecha de recolección. La extracción de la muestra se realizó a los 40 minutos de su instalación, tiempo establecido a través de una prueba piloto. Las muestras fueron transportadas al Laboratorio de Reconversión Ganadera (UIS, sede Málaga) en el menor tiempo posible para evitar la volatilización de los gases.

También se tomaron los datos de temperatura y humedad relativa en cada uno de los sitios, una vez se realizara la extracción de cada muestra. Estas variables fueron determinadas por medio de un termohigrómetro.

Según los resultados obtenidos por el cromatógrafo de gases, el tiempo óptimo para la extracción de las muestras es de 40 minutos, ya que después de este tiempo no se presentan variaciones significativas.

4.3 Análisis de laboratorio.

Las muestras fueron transferidas al cromatógrafo de gases (SHIMADZU GC-2014) (Figura 4) a través de las jeringas de toma de muestras para determinar las concentraciones de CO₂. Los valores se expresaron en la unidad de medida partes por millón (ppm).



Figura 4. Cromatógrafo de gases.

4.4 Procesamiento de datos.

Para cada uno de los valores diarios se calculó su respectiva desviación estándar, con el fin de eliminar los valores atípicos.

4.4.1 Valores medios diarios de concentración de CO₂, humedad y temperatura. Los valores medios diarios de concentración de CO₂ en cada uno de los sitios de estudio se determinaron usando la siguiente fórmula:

$$\bar{X} = \frac{\sum \text{repeticiones}}{N^{\circ}}$$

Donde, las repeticiones refleja el valor de concentración de CO₂ en cada una de las cámaras y N° es el número total de repeticiones.

4.4.2 Valor promedio diario de concentración de CO₂, humedad y temperatura. Para determinar el valor promedio de la concentración de CO₂ se tuvo en cuenta el valor medio de cada día en determinado sitio y se determinó mediante la siguiente formula:

$$u = \frac{\sum \bar{x}}{N^{\circ}}$$

Donde,

u = promedio diario

$\bar{x}$ = valor medio diario

N° = número de días

Para temperatura y humedad se tuvo en cuenta el valor tomado cada día y se usó la fórmula anterior.

4.4.3 Gráficos de dispersión entre las variables de CO₂ (ppm), temperatura (°C) y humedad relativa (%). Se relacionaron los valores de concentración de CO₂ con temperatura y humedad, donde el CO₂ fue la variable dependiente. Las gráficas de dispersión se realizaron mediante el programa estadístico Minitab, donde se ajusta la línea de tendencia.

4.4.4 Correlación de Pearson. Para determinar si existen relaciones entre las variables de CO₂, temperatura y humedad se realizaron correlaciones de Pearson para cada uno de los sitios estudiados, mediante el programa estadístico SAS (Statistical Analysis System).

4.4.5 Modelos de regresión. Se ajustaron modelos de regresión lineal, cuadrática o cúbica a cada una de las relaciones efectuadas en cada sitio, mediante el programa estadístico Minitab.

4.4.6 ANAVA. Para determinar las diferencias estadísticas significativas de los resultados obtenidos, tanto para los tres sitios como entre los dos tipos de bosques, se realizó análisis de varianza (ANAVA), por medio del programa estadístico SAS.

5 Resultados

5.1 Bosque altoandino

5.1.1 Valores medios diarios de concentración de CO₂, humedad y temperatura. Se presentan los valores promedio de las repeticiones por día de concentración de CO₂, humedad relativa y temperatura con su respectiva desviación estándar para el interior del bosque (Tabla 1), donde se encontró el valor máximo de concentración de CO₂ el 18 de noviembre y el valor mínimo el día 28 de noviembre. Se puede identificar un patrón de disminución de CO₂ desde la primera toma a la última.

Para la temperatura se presentó el mayor valor el día 26 de noviembre con 15,2°C, mientras el menor fue el día 27 de noviembre con 10,2°C. En general, la humedad relativa no presentó alta variación donde se destaca el mayor contenido de humedad el día 18 de noviembre y el menor el día 19 de noviembre. Los valores de concentración de CO₂ en el aire muestra el contenido más bajo el día 26 de noviembre con 490 ppm, mientras que el día con mayor concentración es el 27 de noviembre con 610 ppm.

Tabla 1.

Valor medio por día de concentración de CO₂, humedad y temperatura para el interior del bosque altoandino

Fecha	CO₂ (ppm)	DS	T(°C)	HR (%)	CO₂ aire (ppm)
18-nov-2019	3123,3	414,7	12,8	86,6	540
19-nov-2019	2166,6	196,0	14,9	77,8	500
26-nov-2019	2060,0	199,7	15,2	78,4	490
27-nov-2019	2036,6	172,1	10,2	83,1	610
28-nov-2019	1793,2	142,9	11,2	81,6	540

En la Tabla 2, se muestran los valores medios para el borde del bosque. El valor máximo de concentración de CO₂ se presentó el día 18 de noviembre, mientras que el valor mínimo se presentó el 27 de noviembre, las concentraciones de CO₂ presentan una similitud con respecto al

interior. La temperatura y la humedad presentaron los valores mínimos el día 27 y 19 de noviembre y los valores más altos el 26 y 27 de noviembre respectivamente. Las concentraciones de CO₂ en el aire presentaron una mayor diferencia con respecto al interior, donde el valor máximo esta dado el día 19 de noviembre y el valor mínimo el 18.

Tabla 2.

Valor medio por día de concentración de CO₂, humedad y temperatura para el borde del bosque altoandino

Fecha	CO₂ (ppm)	DS	T(°C)	HR(%)	CO₂ aire (ppm)
18-nov-2019	2963,3	749,6	13,7	83,9	330
19-nov-2019	2036,6	179,2	15,3	74,9	740
26-nov-2019	2000,0	141,7	15,5	77,7	510
27-nov-2019	1770,0	113,5	11,1	84,7	500
28-nov-2019	1876,6	228,1	13,5	78,4	540

Finalmente, para el exterior se presentan los promedios de las repeticiones de las variables por día en la Tabla 3. Con respecto al interior y borde del bosque, en el exterior se encontraron los valores más bajos de concentración de CO₂, donde el valor máximo se presentó el día 27 de noviembre con 1706 ppm mostrando una variabilidad muy alta con respecto a los otros días, por el contrario, el más bajo se mostró el día 26 de noviembre con 276 ppm.

La temperatura expresó el valor más alto de los tres sitios estudiados el día 26 de noviembre, el valor mínimo se dio el día 27 de noviembre. Con respecto a la humedad los valores obtenidos presentaron meno variabilidad, donde se expresa el valor más alto el día 18 y 27 de noviembre y el más bajo el día 28.

Tabla 3.

Valor medio de concentración de CO₂, humedad y temperatura para el exterior del bosque altoandino

Fecha	CO₂ (ppm)	DS	T(°C)	HR(%)	CO₂Aire (ppm)
18-nov-2019	606,6	130,5	15,7	83,8	540
19-nov-2019	496,6	265,0	17,6	76	540
26-nov-2019	276,6	70,9	18,7	73,8	540
27-nov-2019	1706,6	125,8	11,3	83,8	550
28-nov-2019	353,3	150,4	15,0	66,7	490

5.1.2 Valor promedio diario de concentración de CO₂, humedad y temperatura. En la Tabla 4, se muestran los valores promedios por día, donde se encontró un patrón de disminución de concentración de CO₂ desde el interior hasta el exterior del bosque. En el cual el máximo valor se dio en el interior del bosque y el más bajo en el exterior, al igual que la humedad relativa. Por el contrario, la temperatura mostró un comportamiento de aumento a medida que se aleja del interior, lo que permite identificar el valor más bajo en el interior y más alto en el exterior. La concentración de CO₂ en el aire mostró una leve variabilidad donde oscilan las concentraciones entre 524 y 536 ppm.

Tabla 4.

Valor promedio diario de concentración de CO₂, humedad y temperatura bosque altoandino

Sitio	CO₂ (ppm)	T(°C)	HR(%)	CO₂Aire (ppm)
Interior	2235,9	12,8	81,5	536
Borde	2129,3	13,8	79,9	524
Exterior	687,9	15,6	76,8	532

5.1.3 Gráficos de dispersión entre las variables de CO₂ (ppm), temperatura (°C) y humedad relativa (%). Las gráficas de dispersión se muestran en la Figura 5 donde se observa una tendencia lineal positiva para la relación en el interior entre CO₂ y humedad relativa (Figura 5: A), por lo contrario, se evidencio una tendencia lineal negativa en el comportamiento del CO₂ y la temperatura en el exterior (Figura 5: F).

Para las gráficas B, C y D en la Figura 5 se observó un aumento de concentración de CO₂ hasta determinado punto donde empieza a descender nuevamente, mostrando una tendencia polinomial cúbica.

En la Figura 5: E se evidencia una tendencia exponencial positiva indicando que, a mayor humedad relativa, mayor concentración de CO₂.

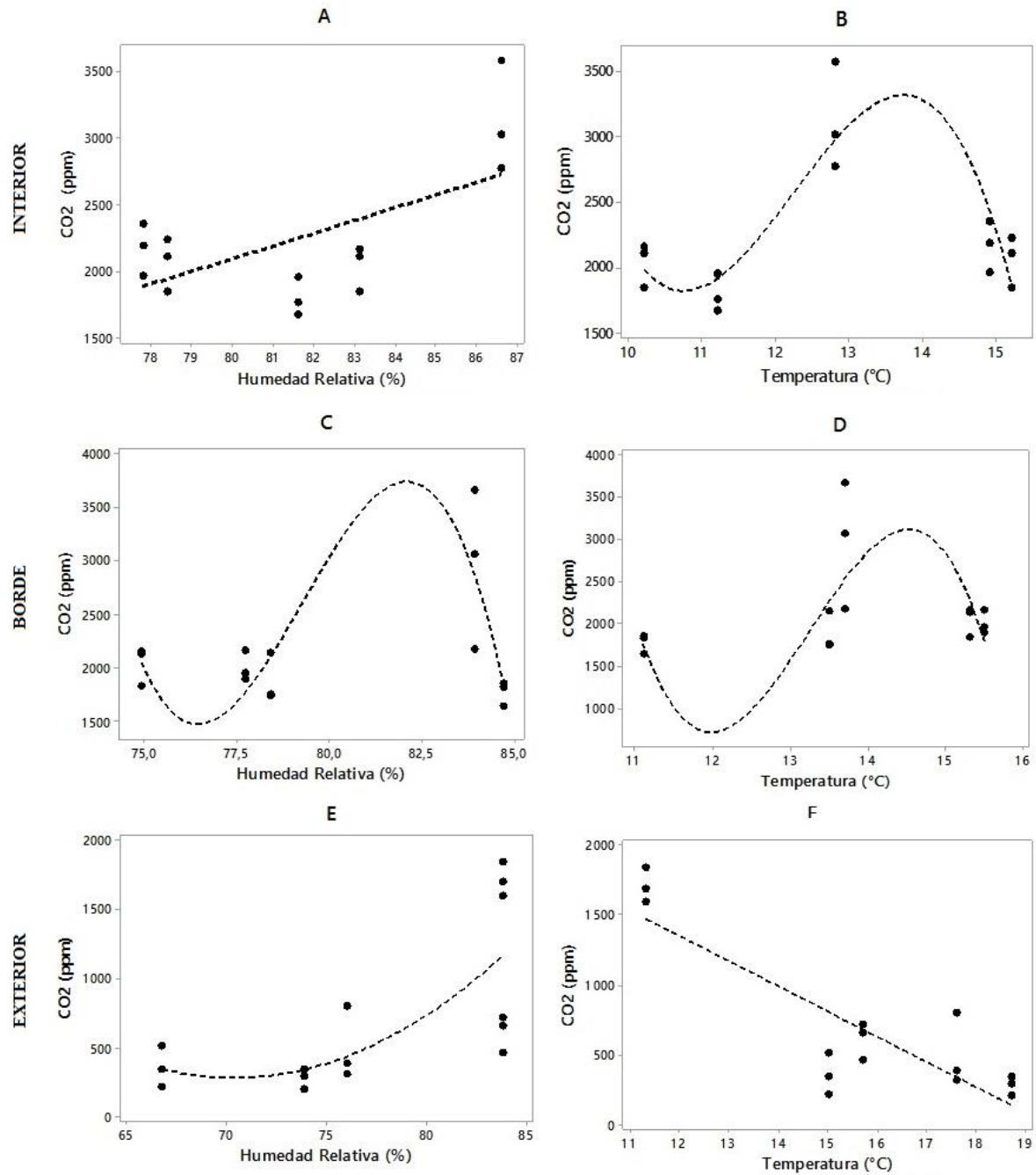


Figura 5. Gráficos de dispersión bosque altoandino.

5.1.4 Correlación de Pearson. Para determinar si existe una relación entre las variables estudiadas se realizó una verificación por medio de correlaciones de Pearson donde el símbolo * en la Tabla 5 denota las relaciones significativas entre las características de temperatura y humedad con la variable dependiente CO₂. Se encontró una mayor relación entre las variables de CO₂ y humedad relativa en el exterior y la menor entre la temperatura y CO₂ en el interior del bosque. Para el borde del bosque se encontró una relación baja con las variables de temperatura y humedad.

Tabla 5.
Coefficientes de correlación de Pearson bosque altoandino

		CO ₂	HR	T
INTERIOR	CO ₂	1	0,6142*	0,1329
	HR	0,6142*	1	-0,6144*
	T	0,1329	-0,6144*	1
BORDE	CO ₂	1	0,2777	0,1459
	HR	0,2777	1	-0,8090*
	T	0,1459	-0,8090*	1
EXTERIOR	CO ₂	1	0,6327*	-0,5295*
	HR	0,6327*	1	-0,4151
	T	-0,5295*	-0,4151	1

5.1.5 Modelos de regresión. Se ajustaron modelos de regresión para cada una de las relaciones buscando el mayor grado de significancia, el 83% de estas permitió generar una modelación a través de regresiones lineales, cuadráticas y cúbicas. El símbolo * en la Tabla 6 representa los modelos de regresión con relación significativa $p < 0,05$. Para el borde la relación entre CO₂ y temperatura no presento una relación significativa.

Las relaciones de CO₂ con humedad relativa en el interior y CO₂ con temperatura en el exterior se ajustaron a modelos de regresión lineal, las demás relaciones se ajustaron a regresiones polinomiales de grado 2 y 3 (Tabla 6).

Tabla 6.

Modelos de regresión para bosque altoandino.

Relación	Ecuación	p-value
Interior CO₂-HR	$CO_2 = -5563 + 95,69 (HR)$	0,015*
Interior CO₂-T	$CO_2 = 200453 - 50044(T) + 4153 (T^2) - 113,2 (T^3)$	0,002*
Borde CO₂-HR	$CO_2 = 12438793 - 471954 (HR) + 5963 (HR^2) - 25,08 (HR^3)$	0,019*
Borde CO₂-T	$CO_2 = 655964 - 150891 (T) + 11493 (T^2) - 289,1 (T^3)$	0,204
Exterior CO₂-HR	$CO_2 = 24306 - 683,1 (HR) + 4,856 (HR^2)$	0,013*
Exterior CO₂-T	$CO_2 = 3509 - 180,1 (T)$	0,000*

5.1.6 Análisis de Varianza (ANAVA) para cada uno de los sitios del bosque altoandino.

En la Figura 6 se presentan las diferencias significativas en los sitios de estudio, analizados mediante una prueba de rango múltiple de Duncan donde se encontraron diferencias estadísticas entre el interior y el borde con el exterior del bosque altoandino. La concentración de CO₂ en el interior y borde del bosque no demostró una diferencia significativa.

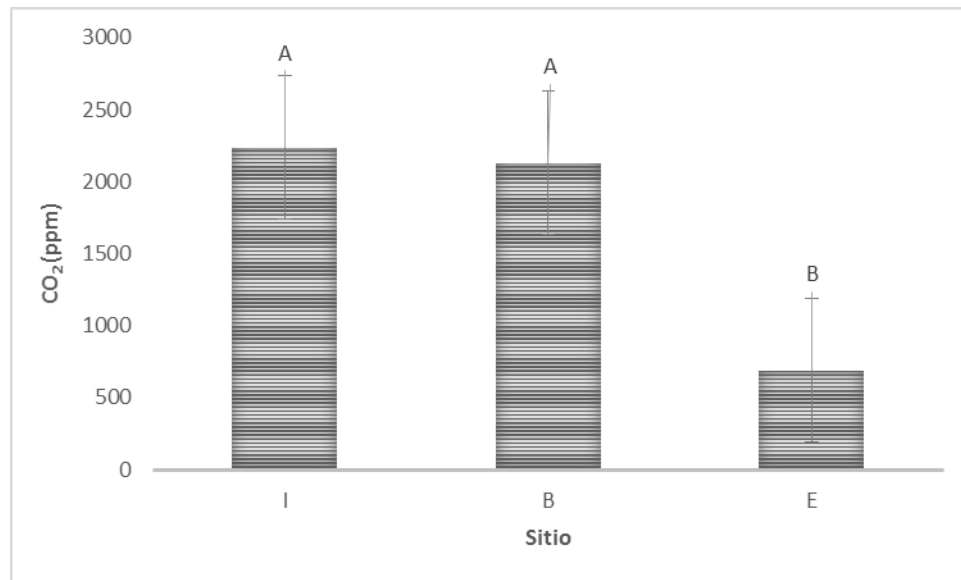


Figura 6. Prueba de rango múltiple de Duncan para las emisiones de CO₂ en los diferentes sitios: I (Interior), B (Borde) y E (Exterior). Las letras A y B indican diferencias significativas para bosque altoandino.

5.2 Bosque seco tropical

5.2.1 Valores medios diarios de concentración de CO₂, humedad y temperatura. Los valores medios de las repeticiones por día de las concentraciones de CO₂, humedad relativa y temperatura para el interior del bosque se presentan en la Tabla 7. Se muestra su respectiva desviación estándar. Donde se encontraron el valor máximo de concentración de CO₂ el 02 de diciembre, además se encontró el valor más alto de temperatura y el más bajo de humedad relativa, el valor mínimo de emisión de CO₂ se dio el día 09 de diciembre, donde se presentó el valor máximo de humedad relativa.

El valor mínimo de temperatura se dio el 04 de diciembre donde además se dio el valor más bajo de CO₂ en el aire. El CO₂ en el aire presentó una variación leve con un valor máximo de 620 ppm y mínimo de 480 ppm.

Tabla 7.

Valor medio por día de concentración de CO₂, humedad y temperatura para el interior del bosque seco

Fecha	CO₂ (ppm)	DS	T(°C)	HR(%)	CO₂ aire (ppm)
02-dic-2019	3906,6	998,1	30,8	52,7	620
03-dic-2019	2593,3	463,7	27,1	57,7	560
04-dic-2019	2096,6	161,9	19,2	86,1	480
09-dic-2019	1756,6	205,0	19,4	86,1	520
10-dic-2019	1813,3	308,9	20,5	72,1	520

Los valores medios de concentración para el borde se presentan en la Tabla 8, donde se puede evidenciar un patrón de disminución en la emisión de CO₂ desde la primera toma hasta la última, donde la máxima concentración se dio el día 02 de diciembre y el valor más bajo el 10 de diciembre. Así mismo, para el día 02 de diciembre se presentaron los valores más altos para temperatura y CO₂ en el aire y el más bajo para humedad relativa.

El valor mínimo de temperatura se dio el día 04 de diciembre donde se presenta el valor más alto de humedad relativa.

Tabla 8.

Valor medio por día de concentración de CO₂, humedad y temperatura para el borde del bosque seco

Fecha	CO₂ (ppm)	DS	T(°C)	HR(%)	CO₂Aire (ppm)
02-dic-2019	2410,0	115,3	31,3	53,9	790
03-dic-2019	1790,0	269,6	27,3	61,2	500
04-dic-2019	1550,0	302,6	20,5	80,1	490
09-dic2019	1473,3	395,2	20,6	80,1	470
10-dic-2019	1413,3	457,2	22,8	58,0	480

Finalmente, se muestran los resultados obtenidos para el valor medio diario de las concentraciones de CO₂, humedad y temperatura para el exterior del bosque, donde se presentó mayor variabilidad en la emisión de CO₂, con un valor máximo de 1316 ppm el día 02 de diciembre y un valor mínimo de 323 ppm el día 03 de diciembre. De igual forma la temperatura presentó su valor máximo el día 02 de diciembre y su valor más bajo el día 04 de diciembre. La humedad relativa mantuvo una relación inversamente proporcional con la temperatura, con su valor más bajo el 02 de diciembre y valor más alto el 04 de diciembre. El CO₂ en el aire mostró una variabilidad moderada donde los valores oscilan entre 430 y 760 ppm.

Tabla 9.

Valor medio por día de concentración de CO₂, humedad y temperatura para el exterior del bosque seco

Fecha	CO₂ (ppm)	DS	T(°C)	HR(%)	CO₂ aire (ppm)
02-dic-2019	1316,6	142,9	47,6	31,4	760
03-dic-2019	323,3	110,1	33,6	49,4	490
04-dic-2019	1156,6	498,6	22,0	70,3	610
09-dic-2019	1040,0	122,8	23,5	65,8	430
10-dic-2019	806,6	80,8	37,4	34,9	440

5.2.2 Valor promedio diario de concentración de CO₂, humedad y temperatura. Los valores promedios por día en el bosque seco se presentan en la Tabla 10 donde se encontró un patrón en el comportamiento de CO₂ y humedad relativa, aumentado desde el exterior hasta el interior del bosque. La temperatura actuando de forma inversa a la humedad y CO₂ disminuyendo del exterior hacia el interior del bosque. En general, los valores promedios de CO₂ en el aire no presentaron variación siendo el valor máximo en el borde y exterior con 546 ppm y el valor mínimo en el interior con 540 ppm.

Tabla 10.

Valor promedio por día de concentración de CO₂, humedad y temperatura total bosque seco.

Sitio	CO ₂ (ppm)	T(°C)	HR(%)	CO ₂ Aire (ppm)
Interior	2433,2	23,4	70,9	540
Borde	1727,2	24,5	66,6	546
Exterior	928,6	32,8	50,3	546

5.2.3 Gráficos de dispersión entre las variables de CO₂ (ppm), temperatura (°C) y humedad relativa (%). En la Figura 7, se evidenció el comportamiento de CO₂ frente a las variables de temperatura y humedad. Se observó una relación lineal positiva en las variables de temperatura y CO₂ en el interior y borde del bosque (Figura 7: B y D). Para la Figura 7: A y C se obtuvo un comportamiento exponencial negativo donde disminuye la concentración de CO₂ hasta cierto punto, donde empieza a aumentar y un comportamiento exponencial positivo para la Figura 7: E y F.

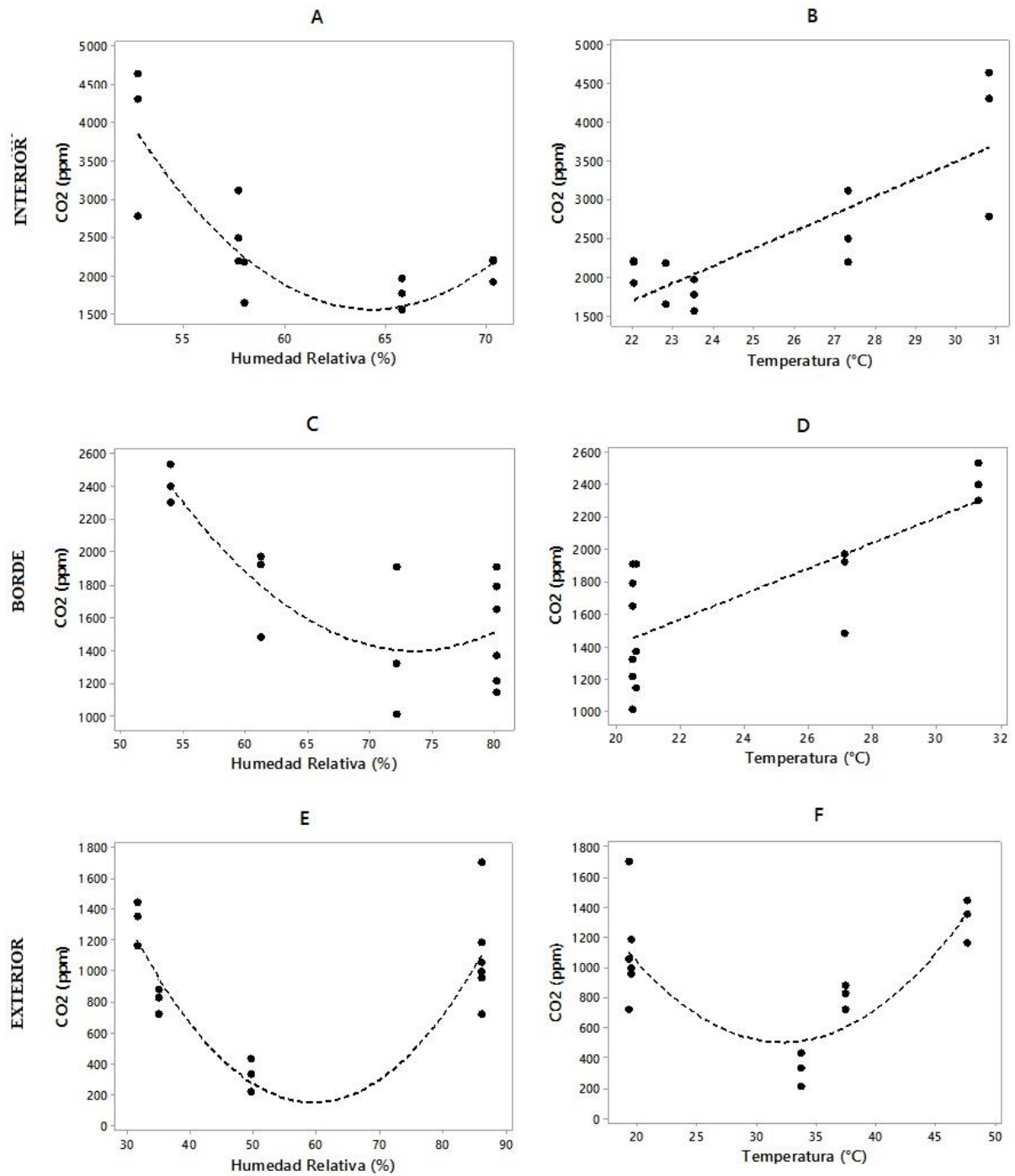


Figura 7. Gráfico de dispersión bosque seco.

5.2.4 Correlación de Pearson. La relación de las variables de CO₂, temperatura y humedad fueron verificadas a través de correlaciones de Pearson (Tabla 11). Se presentó una relación entre las variables para el interior y el borde del bosque, donde la correlación más alta se dio con la temperatura en el interior, sin embargo, el exterior no presentó una relación con la temperatura y humedad.

Tabla 11.
Coeficientes de correlación de Pearson bosque seco

		CO ₂	HR	T
INTERIOR	CO ₂	1	-0,6082*	0,8251*
	HR	-0,6082*	1	-0,8080*
	T	0,8251*	-0,8080*	1
BORDE	CO ₂	1	-0,7009*	0,7700*
	HR	-0,7009*	1	-0,9563*
	T	0,7700*	-0,9563*	1
EXTERIOR	CO ₂	1	0,1506	0,0047
	HR	0,1506	1	-0,9657*
	T	0,0047	-0,9657*	1

5.2.5 Modelos de regresión. En la Tabla 12, se muestran las regresiones (lineal, cuadrática o cubica) que se ajustaron para cada una de las relaciones. El 100% de las variables permitió adaptar un modelo matemático con $p < 0,05$. Donde las variables de interior y borde CO₂ con temperatura se ajustaron a un modelo de regresión lineal y las demás relaciones a regresiones polinomiales de grado 2. Se puede inferir que un aumento en una unidad de temperatura o humedad incide en los aumentos de emisión de CO₂ dado que las pendientes en cada una de las ecuaciones son positivas.

Tabla 12.
Modelos de regresión bosque seco

Relación	Ecuación	p-value
Interior CO₂-HR	$CO_2 = 72104 - 2194 (HR) + 17,06 (HR^2)$	0,001
Interior CO₂-T	$CO_2 = -3260 + 225,2 (T)$	0,000
Borde CO₂-HR	$CO_2 = 15511 - 383,8 (HR) + 2,609 (HR^2)$	0,001
Borde CO₂-T	$CO_2 = -154,9 + 78,43 (T)$	0,001
Exterior CO₂-HR	$CO_2 = 4893 - 159,7 (HR) + 1,343 (HR^2)$	0,001
Exterior CO₂-T	$CO_2 = 4173 - 228,4 (T) + 3,553 (T^2)$	0,002

5.2.6 Análisis de Varianza (ANAVA) para que uno de los sitios del bosque seco. En la Figura 8, se presentan las diferencias estadísticas significativas en los tres sitios de estudio. Se encontró una diferencia significativa para los tres casos, presentando los mayores valores de concentración en el interior, mientras que los menores en el exterior.

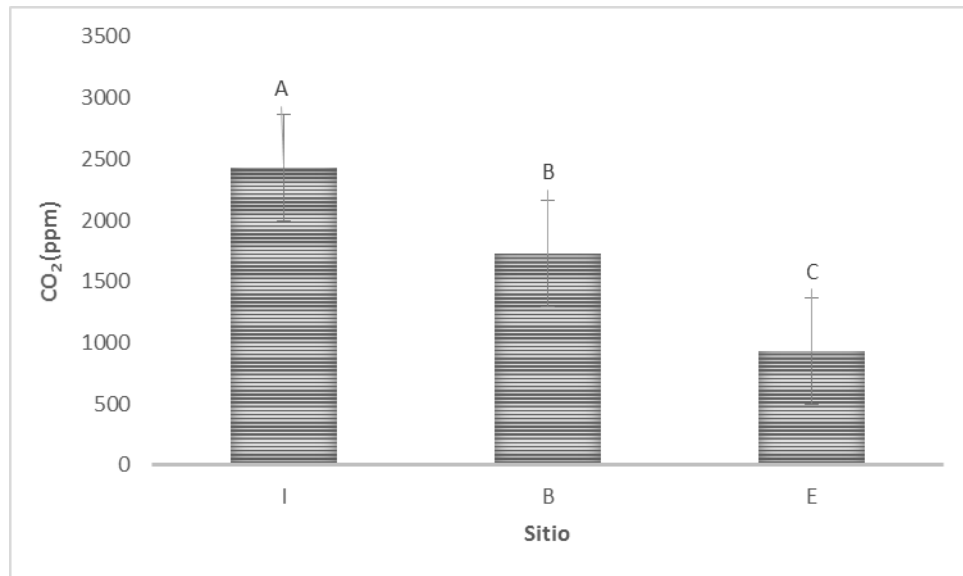


Figura 8. Prueba de rango múltiple de Duncan para las emisiones de CO₂ en los diferentes sitios: I (Interior), B (Borde) y E (Exterior). Las letras A, B y C indican diferencias significativas para bosque seco.

5.3 Análisis de Varianza (ANAVA) para la comparación entre ecosistemas.

El contraste de medias presentó diferencias significativas entre cada uno de los sitios de los dos ecosistemas. El interior de los dos ecosistemas no presentó diferencias significativas igual que el borde y exterior, sin embargo, se puede observar una diferencia significativa en las emisiones de CO₂ en el exterior con los demás sitios del bosque (Figura 9).

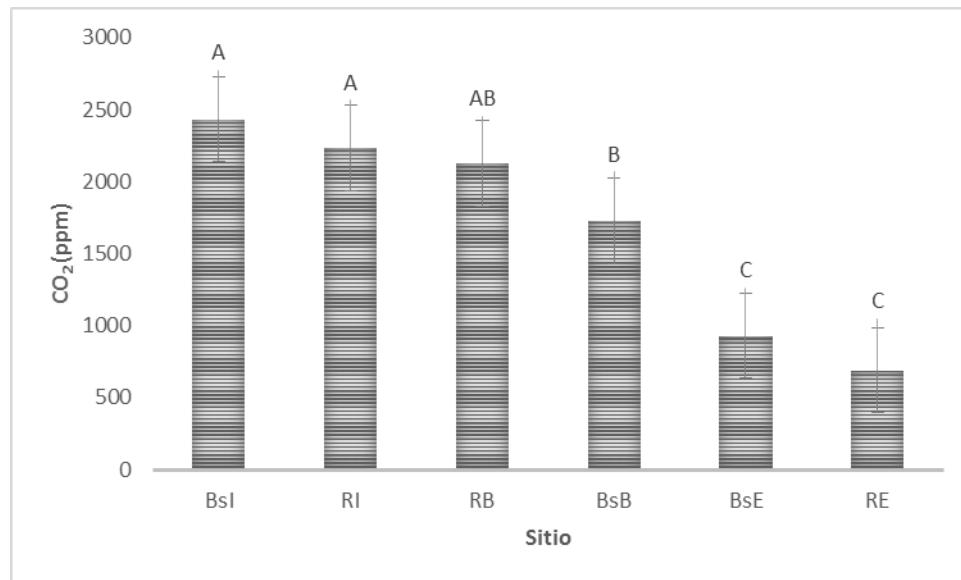


Figura 9. Prueba de rango múltiple de Duncan para las emisiones de CO₂ en los diferentes sitios: I (Interior), B (Borde) y E (Exterior) en dos tipos de ecosistema: R (Robledal) y Bs (Bosque seco). Las letras A, B y C indican diferencias significativas para bosque seco.

6 Discusión

La creciente demanda de productos agrícolas, ganaderos y forestales conlleva a la destrucción y/o fragmentación del bosque y con esto incrementos en la emisión de GEI. Siendo estos gases los promotores del calentamiento global, por ello conocer los ciclos de GEI en la atmosfera ha cobrado mayor importancia convirtiéndose en una de las principales preocupaciones a nivel mundial, buscando mitigar los impactos negativos causados a la atmosfera. Así mismo, conocer las relaciones entre los cambios en los procesos ecológicos por fragmentación del bosque y zonas de transición (Peña *et al.*, 2005)

Los resultados encontrados en la investigación demuestran que a medida que se aleja del interior al exterior del bosque disminuye la concentración de CO₂ en el suelo, similar a los resultados reportados por Sánchez (2015) donde el comportamiento del CO₂ reflejó un patrón de

comportamiento lineal de pendiente negativa. Por otra parte, las variables de temperatura y humedad inciden en la concentración de CO₂ contrario al estudio realizado por Serran *et al.* (2017) donde estas variables no presentaron relación estadística.

La alta degradación y fragmentación está sujeta a los impactos generados por la comunidad, determinando la capacidad de penetración de estos efectos al interior del borde (López, 2004). El efecto de borde crea una alteración en los procesos ecológicos del bosque determinando cambios abióticos (temperatura y humedad relativa) y biológicos (Peña *et al.*, 2005) similar a lo encontrado, donde se muestra un cambio en las variables abióticas, impactando de forma negativa la provisión de servicios ecosistémicos como lo es la regulación del clima.

La emisión de CO₂ está estrechamente relacionada con la temperatura y humedad, permitiendo ajustar un modelo de regresión matemático para estas variables, similar a los resultados obtenidos por López y Gil (2008) donde se obtienen los flujos de CO₂ por medio de cámaras cerradas y se correlaciona con un patrón robusto a la temperatura del aire.

Los ecosistemas terrestres actúan como sumideros de CO₂ equilibrando las emisiones promedio de la actividad humana. El suelo es el mayor reservorio de carbono de los ecosistemas terrestres y a su vez la mayor fuente de emisión atmosférica (Serran *et al.*, 2017). Oviedo (2007) en su estudio proyecta que la respiración del suelo depende de la temperatura del mismo, sin embargo, está ligado a las condiciones físicas y químicas de este, situación similar a la presentada en este estudio donde se relaciona la temperatura y humedad.

La temperatura y la humedad son influenciadores de las concentraciones de CO₂ siendo así, a mayor temperatura menor CO₂ y a mayor humedad mayor CO₂, contrario al estudio realizado por Sancí *et al.* (2010) donde el flujo de CO₂ está influenciado por la humedad y la temperatura donde a mayor humedad menor concentración de CO₂ y a mayor temperatura mayor flujo de

CO₂, posiblemente se debe a que los ecosistemas de estudio presentan características totalmente diferentes.

Las diferencias significativas en los tres sitios de estudio demuestran el impacto negativo que genera el cambio de coberturas influenciado por el efecto de borde generando alteraciones en la temperatura, humedad relativa como se demostró en el presente estudio. En términos generales hay una relación entre la concentración del suelo, el contenido de humedad y la temperatura (Serran *et al.*, 2017). Sin embargo, este factor puede variar en diferentes ambientes y ecosistemas debido a demás interacciones o variables que inciden en el comportamiento de este fenómeno.

El cambio en la temperatura global depende del calentamiento donde se proyecta un aumento en la temperatura en un rango de 0,3° a 0,7°C para el periodo 2016 - 2035 y un aumento de 2°C para el final del siglo, estos cambios corresponden al periodo 2081 - 2100 según IPCC (2014) de cumplirse esta proyecciones y estudiando los modelos de regresión propuestas la emisión de CO₂ aumentaría el 1% aproximadamente para cada uno de los sitios del bosque estudiados en el presente trabajo.

7 Conclusiones

Este trabajo refleja la importancia de los bosques naturales jugando un papel muy importante en la conservación del suelo y disminución en las pérdidas de regulación de funciones ecosistémicas (regulación del clima) determinando la provisión de servicios ecosistémicos, ya que estos son los principales encargados de almacenar el CO₂ en su estructura (estrato aéreo y terrestre).

La concentración de CO₂ emitida en el suelo mostro una diferencia significativa donde la mayor concentración de CO₂ se encuentra en el interior del bosque dada por alta actividad microbiana y la menor en el exterior.

Existe una relación entre la emisión de CO₂ con la temperatura, humedad y distancia del interior hasta el borde del bosque.

Cada uno de los sitios estudiados presento una concentración de CO₂ similar en los dos tipos de ecosistema donde se evidencia la alteración en el comportamiento del gas debido al efecto de borde que modifica las características propias del bosque (temperatura y humedad relativa).

8 Recomendaciones

La toma de muestras debe ser realizada en un periodo de tiempo más largo, buscando mostrar diferencias entre las épocas de invierno y verano para obtener mayor información en el comportamiento del CO₂.

Analizar variables propias del suelo, como contenido de materia orgánica, pH y temperatura dentro de este, que incidan negativa o positivamente en la emisión de CO₂.

Referencias Bibliográficas

- Avella, A., y Cárdenas, L. (2010). Conservación y uso sostenible de los bosques de roble en el corredor de conservación Guantiva-LaRusia-Iguaque departamentos de Santander y Boyacá, Colombia. *Colombia Forestal*, 13(1), 5–26. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v13n1/v13n1a02.pdf>
- Balvanera, P., Avalaas, H. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas*, 21(1–2), 136–147.
- Balvanera, P. (2007). Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta Ecológica* 85(84-85), 8–15. Recuperado de http://produccionbovina.com/regiones_ganaderas/27-Ecosist_del_Delta-2010.pdf
- Benavides, H. O. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. Bogotá: IDEAM, 1–102. <https://doi.org/IDEAM-METEO/008-2007>
- Briceño, J., Iñiguez-Gallardo, V., y Ravera, F. (2016). Factores que influyen en la percepción de servicios de los ecosistemas de los bosques secos del sur del Ecuador. *Ecosistemas*, 25(2), 46–58. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-2.06>
- Contreras, M. R., Luna, V. I., y Ríos, M., C. A. (2010). Distribution of *Taxus globosa* (Taxaceae) in Mexico: Ecological niche modeling, effects of land use change and conservation. *Revista Chilena de Historia Natural*, 83(3), 421–433. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2010000300009>
- Dorado, A., Caravaca, P., y Mirko, S. (2010). ¿Qué es la biodiversidad?. Madrid, España: Fundación Biodiversidad. Recuperado de <http://www.ecomilenio.es/wp-content/uploads/2010/10/que-es-la-biodiversidad-web.pdf>
- Etter, A., Mcalpine, C., Wilson, K., Phinn, S., y Possingham, H. (2006). Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosyst Environ*, 114(2-4), 369-386. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000095&pid=S0304-3584201100020000500024&lng=en
- Fernández, M., Vicca, S., Janssens, I. A., Ciais, P., Obersteiner, M., Bartrons, M., y Peñuelas, J. (2017). Atmospheric deposition, CO₂, and change in the land carbon sink. *Scientific Reports*, 7(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08755-8>
- González, R., Isaacs, P., Pizano, C., y García, H. (2014). Memoria técnica para la verificación en campo del mapa de bosque seco tropical en Colombia escala 1:100.000. *Instituto de Investigación de Recursos Biológicos “Alexander von Humboldt” – Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Bogotá, Colombia. 29p. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

- Granados, C. (2014). Efecto de borde en la composición y en la estructura de los bosques templados. Sierra de monte-alto, centro de México. *Caldasia*, 36(2), 269–287. <https://doi.org/10.15446/caldasia/v36n2.47486>
- Guariguata, M. R., y Ostertag, R. (2002). *Sucesión secundaria. Ecología de bosques neotropicales*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica. Recuperado de <http://academic.uprm.edu/~jchinea/cursos/ecolplt/lectesc/GUARI.PDF>
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos “Alexander von Humboldt”. (1998). *El Bosque Seco Tropical En Colombia*. Recuperado de <http://media.utp.edu.co/cieblog/archivos/bosque-seco-tropical/el-bosque-seco-tropical-en-colombia.pdf>
- Kessler, M., Driesch, P. (1993). Causas e Historia de la Destrucción de Bosques Altoandinos en Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 21(1), 1–18. Recuperado de <http://ecologiaenbolivia.com/documents/KesslerDriesch21.pdf>
- Leiva, J. A., Rocha, O. J., Mata, R., y Gutiérrez-Soto, M. V. (2009). Cronología de la regeneración del bosque tropical seco en Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica. II. La vegetación en relación con el suelo. *Revista de Biología Tropical*, 57(3), 817–836. <https://doi.org/10.15517/rbt.v57i3.5495>
- León, J. D., Vélez, G., y Yepes, A. P. (2009). Estructura y composición florística de tres robledales en la región norte de la cordillera central de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 57(4), 1165–1182. <https://doi.org/10.15517/rbt.v57i4.5454>
- López, F. (2004). Estructura y Función en Borde De Bosques. *Revista ecosistemas*, 13(1), 67–77. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/26460401_Estructura_y_funcion_en_bordes_de_bosques
- López, M. J., y Ramírez, N. (2004). Composición florística y abundancia de las especies un remanente de bosque deciduo secundario. *Acta Biología Venezuela*, 24(2), 29–71. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/281820072_Lopez_M_N_Ramirez_2013_Fenologia_reproductiva_de_un_remanente_de_bosque_deciduo_secundario_Acta_Biologica_Venezuela_33_1-22
- Mendoza, C., H. (1999). Estructura y riqueza florística del bosque seco tropical en la región Caribe y el Valle del río Magdalena, Colombia. *Caldasia*, 21(1), 70–94. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/21199/1/17503-55732-1-PB.pdf>
- Montenegro, A. L., y Ríos, O. V. (2008). Caracterización de bordes de bosque altoandino e implicaciones para la restauración ecológica en la Reserva Forestal de Cogua (Colombia). *Revista de Biología Tropical*, 56(3), 1543–1556. <https://doi.org/10.15517/rbt.v56i3.5728>

- Murphy, P. G., y Lugo, A. E. (1986). Ecology of tropical dry forest. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 17(1986), 67–88. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.17.110186.000435>
- Nava C. Y., Maass M. M., Briones V. O., y Méndez R. I. (2007). Evaluación del efecto de borde sobre dos especies del bosque tropical caducifolio de Jalisco, México. *Agrociencia*, 41(1), 111–120. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952007000100111
- Ordoñez, J. A., Jong, B. H., y Masera, O. (2001). Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques*, 7(2), 27–47. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/617/61770204.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2002). Estado de la información forestal en Colombia. *Información y Análisis Para El Manejo Forestal Sostenible: Integrando Esfuerzos Nacionales e Internacionales En 13 Países Tropicales En América Latina*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/ad406s/AD406s14.htm>
- Oviedo, B., L. (2007). *Medición de la Respiración del suelo en Ecosistemas Mediterráneos con Sistemas de Cámaras y Analizadores tipo IRGA* (tesis de maestría). Universidad de Granada, España. Recuperado de <https://www.ugr.es/~andyk/Theses/TesisLMOB.pdf>
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático. (2014). *Cambio climático: Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- Paz, J., y Ospina, R. (2012). Características florísticas de un bosque de roble (*Quercus humboldtii*) en la meseta de Popayán (Cauca). *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 10(2), 243–248. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v10n2/v10n2a28.pdf>
- Peña, B. J., Monroy, A., Álvarez, F., y Orozco, A. M. (2005). Uso del efecto de borde de la vegetación para la restauración ecológica del bosque tropical. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 8(2), 91–98. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tip/v8n2/1405-888X-tip-8-02-91.pdf>
- Ramírez, V., Aranda, L., y Rico, V. (2018). La resiliencia del bosque seco tropical: Un seguro de vida para su conservación. *Conabio*, 137(1), 12–16. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/330956173_LA_RESILIENCIA_DEL_BOSQUE_SECO_TROPICAL_UN_SEGURO_DE_VIDA_PARA_SU_CONSERVACION/link/5c5cff4745851582c3d5a7b1/download
- Romero T. M., y Ramírez, A. V. (2011). Efecto de borde sobre el proceso de descomposición de hojarasca en Bosque Nublado. *Acta Biológica Colombiana*, 16(2), 155–174. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/15707/28017>

- Sánchez, O. F. (2015). *Efecto de borde post quema sobre el contenido de carbono orgánico del suelo en una interfase sabana-bosque de galería en el Vichada, Colombia* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/52542/>
- Sanci, R., Panarello, H. O., y Ostera, H. A. (2010). Flujo de dióxido de carbono en el flanco oriental del volcán Peteroa, Andes del Sur. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 27(2), 225–237. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742010000200003
- Santos, A. L., y Gil, J. A. (2008). *Flujos de CO₂ y le medimos con cámaras de intercambio de gas y sensores de ir bajo condiciones de cielo abierto* (tesis de postgrado). Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la UACH, Bermejillo, México. Recuperado de <https://chapingo.mx/revistas/phpscript/download.php?file=completo&id=MTcxOA==>
- Serran, E. Z., Núñez, M., y Valleter, E. (2017). Respiración de dióxido de carbono de suelo, en bosque tropical húmedo – Gamboa Panamá. *I+D Tecnológico*, 13(2), 49–54. Recuperado de <http://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/1714>
- Vargas, M. A., y Yáñez, S. A. (2004). La captura de carbono en bosques: ¿una herramienta para la gestión ambiental? *Gaceta Ecológica*, (70), 5–18. Recuperado de <http://redalyc.org/articulo.oa?id=53907001>
- Zamora, M., Hernández, H. A., Pérez, O., Benítez, B. G., e Ibáñez, S. (2016). Cambio Global: El Antropoceno. *CIENCIA Ergo-Sum*, 23(1), 67–75. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5379210.pdf>

Apéndices

Apéndice A.

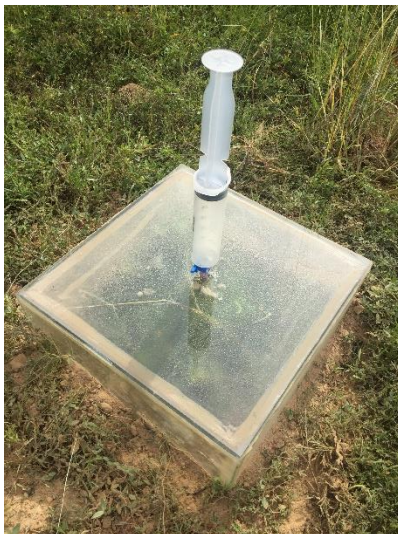
Establecimiento de parcelas.



Apéndice B.

Diseño experimental.



*Apéndice C.**Instalación de cámaras.**Apéndice D**Toma de muestras.*

*Apéndice E**Cromatógrafo de gases.**Apéndice F**Procesamiento de muestras de laboratorio.*

Apéndice G

Resultados cromatógrafo de gases.

