

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE TRES FACTORES ABIÓTICOS SOBRE  
EL CRECIMIENTO DE 10 ESPECIES DE ÁRBOLES SEMBRADOS EN EL  
PROYECTO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DEL CERRO EL  
VOLADOR EN MEDELLÍN, ANTIOQUIA.**

Elaborado por:

**FELIPE VILLEGAS VÉLEZ  
TOMÁS HINESTROZA KOPPEL**

Trabajo presentado como requisito parcial  
para optar al título de:  
**Biólogos**

Asesores:

**FELIPE A. CARDONA**

Biólogo, Candidato Ph. D.

Director Herbario de la Universidad de Antioquia (HUA)

**CRISTINA LÓPEZ GALLEGO**

Bióloga, Ph. D. Biología de la conservación

Profesora Universidad de Antioquia

**INSTITUTO DE BIOLOGÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA  
MEDELLÍN  
2011**



*“La hora pasa, la pena se olvida, mas la obra queda.”*

**Viktor E. Frankl**

## RESUMEN

La degradación de ecosistemas naturales en el último siglo ha llevado a la pérdida de bienes y servicios ambientales. La restauración ecológica surge como una estrategia para restablecer dichos bienes y servicios. En este sentido, la Secretaría de Medio Ambiente de Medellín desarrolla un proyecto de restauración ecológica en el Parque Natural Regional Metropolitano Cerro El Volador ubicado en Medellín, Antioquia, Colombia. Este proyecto busca establecer áreas de bosques y evaluar la pertinencia del uso de fertilizantes, micorrizas y tierra preparada con materia orgánica sobre el crecimiento de los árboles. Se sembraron 10.000 árboles de más de 100 especies, aplicando cinco tratamientos de fertilización. Sin embargo, se ha observado que la heterogeneidad de las condiciones ambientales está teniendo un efecto sobre el desarrollo de algunas especies. En el presente estudio evaluamos el efecto de los tratamientos de fertilización y tres variables ambientales, disponibilidad lumínica, hídrica e incidencia de vientos, sobre el crecimiento de diez especies de árboles utilizadas en dicho proyecto. Utilizando prueba de Kruskal-Wallis se determinó que los tratamientos de fertilización afectaron el crecimiento de algunas especies y aunque no se observa un patrón común, se evidencia un efecto positivo en el crecimiento causado por el uso de tierra preparada. Se observó que cada especie tiene una respuesta propia a los factores evaluados, aunque las especies pertenecientes a un mismo grupo funcional tuvieron respuestas similares. Cada factor abiótico afectó una cantidad similar de especies, señalando casi siempre una respuesta negativa a los altos niveles de cada variable. Este estudio identifica algunas características ambientales apropiadas para la siembra y utilización de estas especies en proyectos similares.

Palabras Clave: Restauración ecológica, Cerro el Volador, crecimiento, fertilización, disponibilidad hídrica, disponibilidad lumínica, incidencia de vientos.

## **TABLA DE CONTENIDOS**

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
1.1. <i>Degradación y Restauración.....</i>	7
1.2. <i>Panorama de la restauración de ecosistemas en Colombia .....</i>	8
1.3. <i>Condiciones ambientales apropiadas para el establecimiento de árboles en programas de restauración ecológica. ....</i>	9
1.4. <i>Disponibilidad lumínica, hídrica e incidencia de vientos .....</i>	10
<b>2. PROYECTO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL CERRO EL VOLADOR.....</b>	<b>12</b>
<b>3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y HIPÓTESIS.....</b>	<b>15</b>
3.1. <i>Planteamiento del problema.....</i>	15
3.2. <i>Hipótesis principal.....</i>	16
3.3. <i>Hipótesis derivadas .....</i>	16
<b>4. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>18</b>
4.1. <i>Área de estudio.....</i>	18
4.2. <i>Selección de especies.....</i>	18
4.3. <i>Cálculo de tasas de crecimiento (diámetro y altura) .....</i>	19
4.4. <i>Disponibilidad Hídrica .....</i>	20
4.5. <i>Incidencia de vientos. ....</i>	21
4.6. <i>Disponibilidad Lumínica .....</i>	22
4.7. <i>Análisis estadístico .....</i>	22
4.7.1. <i>Contenido hídrico de las diferentes categorías topográficas.....</i>	22
4.7.2. <i>Efecto de los tratamientos de fertilización y factores abióticos .....</i>	22
<b>5. RESULTADOS: EFECTO DE LOS FACTORES ABIÓTICOS .....</b>	<b>24</b>
5.1. <i>Resultados generales .....</i>	24
5.2. <i>Disponibilidad Hídrica .....</i>	25
5.3. <i>Disponibilidad Lumínica.....</i>	27
5.4. <i>Incidencia de Vientos.....</i>	29
5.5. <i>Tratamientos Experimentales de Fertilización .....</i>	31
<b>6. RESULTADOS: EFECTO DE LOS FACTORES EVALUADOS SOBRE CADA ESPECIE.....</b>	<b>33</b>
6.1. <i>Ardisia sp. ....</i>	33
6.2. <i>Caesalpinia ebano H. Karst.....</i>	34
6.3. <i>Cariniana pyriformis Miers.....</i>	35
6.4. <i>Dipteryx oleifera Benth.....</i>	36
6.5. <i>Luehea seemannii Triana &amp; Planch. ....</i>	37
6.6. <i>Pithecellobium sp.....</i>	37
6.7. <i>Quercus humboldtii Bonpl.....</i>	38
6.8. <i>Schizolobium parahyba (Vell.) S.F. Blake.....</i>	39

6.9. <i>Swietenia macrophylla</i> King.....	40
6.10. <i>Tabebuia chrysantha</i> (Jacq.) G. Nicholson.....	40
<b>7. DISCUSIÓN: EFECTO DE LOS FACTORES ABIÓTICOS .....</b>	<b>42</b>
<b>8. DISCUSIÓN: EFECTO DE LOS FACTORES EVALUADOS SOBRE CADA ESPECIE....</b>	<b>45</b>
8.1. <i>Ardisia</i> sp. ....	45
8.2. <i>Caesalpinia ebano</i> H. Karst.....	48
8.3. <i>Cariniana pyriformis</i> Miers.....	50
8.4. <i>Dipteryx oleifera</i> Benth.....	52
8.5. <i>Luehea seemanii</i> Triana & Planch. ....	54
8.6. <i>Pithecellobium</i> sp. ....	56
8.7. <i>Quercus humboldtii</i> Bonpl.....	58
8.8. <i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) S.F. Blake.....	60
8.9. <i>Swietenia macrophylla</i> King .....	62
8.10. <i>Tabebuia chrysantha</i> (Jacq.) G. Nicholson.....	64
<b>11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>66</b>
<b>12. AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>68</b>
<b>13. REFERENCIAS.....</b>	<b>69</b>

## **LISTADO DE TABLAS**

<b>TABLA 1.</b> COMPOSICIÓN DE LOS TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES DE FERTILIZACIÓN APLICADOS EN EL PROYECTO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DEL CERRO EL VOLADOR. ....	13
<b>TABLA 2.</b> LISTA DE ESPECIES SELECCIONADAS Y NÚMERO DE ÁRBOLES EVALUADOS EN EL ESTUDIO. ....	19
<b>TABLA 3.</b> RESUMEN DE LOS RESULTADOS GENERALES Y DE LAS PRUEBAS K-W PARA EL EFECTO DE CADA FACTOR SOBRE LAS TASAS DE CRECIMIENTO PROPORCIONAL EN DIÁMETRO (TCPD) Y ALTURA (TCPA). ....	24
<b>TABLA 4.</b> EFECTOS DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SOBRE LAS TASAS DE CRECIMIENTO PROPORCIONAL EN DIÁMETRO (TCPD) Y ALTURA (TCPA) PARA LAS ESPECIES CON VALORES $P < 0,1$ . ....	26
<b>TABLA 5.</b> EFECTOS DE LA DISPONIBILIDAD LUMÍNICA SOBRE LAS TASAS DE CRECIMIENTO PROPORCIONAL EN DIÁMETRO (TCPD) Y ALTURA (TCPA) PARA LAS ESPECIES CON VALORES $P < 0,1$ . ....	28
<b>TABLA 6.</b> EFECTOS DE LA INCIDENCIA DE VIENTOS SOBRE LAS TASAS DE CRECIMIENTO PROPORCIONAL EN DIÁMETRO (TCPD) Y ALTURA (TCPA) PARA LAS ESPECIES CON VALORES $P < 0,1$ . ....	30
<b>TABLA 7.</b> EFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS DE FERTILIZACIÓN SOBRE LAS TASAS DE CRECIMIENTO PROPORCIONAL EN DIÁMETRO (TCPD) Y ALTURA (TCPA) PARA LAS ESPECIES CON VALORES $P < 0,1$ . ....	32
<b>TABLA 8.</b> RESUMEN DE LOS RESULTADOS GENERALES DE <i>ARDISIA SP.</i> Y VALORES P DE LAS PRUEBAS K-W PARA CADA FACTOR EVALUADO. ....	33
<b>TABLA 9.</b> RESUMEN DE LOS RESULTADOS GENERALES DE <i>CAESALPINIA EBANO</i> Y VALORES P DE LAS PRUEBAS K-W PARA CADA FACTOR EVALUADO. ....	34
<b>TABLA 10.</b> RESUMEN DE LOS RESULTADOS GENERALES DE <i>CARINIANA PYRIFORMIS</i> Y VALORES P DE LAS PRUEBAS K-W PARA CADA FACTOR EVALUADO. ....	35
<b>TABLA 11.</b> RESUMEN DE LOS RESULTADOS GENERALES DE <i>DIPTERYX OLEIFERA</i> Y VALORES P DE LAS PRUEBAS K-W PARA CADA FACTOR EVALUADO. ....	36
<b>TABLA 12.</b> RESUMEN DE LOS RESULTADOS GENERALES DE <i>LUEHEA SEEMANNII</i> Y VALORES P DE LAS PRUEBAS K-W PARA CADA FACTOR EVALUADO. ....	37
<b>TABLA 13.</b> RESUMEN DE LOS RESULTADOS GENERALES DE <i>PITHECELLOBIUM SP.</i> Y VALORES P DE LAS PRUEBAS K-W PARA CADA FACTOR EVALUADO. ....	37

<b>TABLA 14.</b> RESUMEN DE LOS RESULTADOS GENERALES DE <i>QUERCUS HUMBOLDTII</i> Y VALORES P DE LAS PRUEBAS K-W PARA CADA FACTOR EVALUADO. ....	38
<b>TABLA 15.</b> RESUMEN DE LOS RESULTADOS GENERALES DE <i>SCHIZOLOBIUM PARAHYBA</i> Y VALORES P DE LAS PRUEBAS K-W PARA CADA FACTOR EVALUADO. ....	39
<b>TABLA 16.</b> RESUMEN DE LOS RESULTADOS GENERALES DE <i>SWIETENIA MACROPHYLLA</i> Y VALORES P DE LAS PRUEBAS K-W PARA CADA FACTOR EVALUADO. ....	40
<b>TABLA 17.</b> RESUMEN DE LOS RESULTADOS GENERALES DE <i>TABEBUIA CHRYSANTHA</i> Y VALORES P DE LAS PRUEBAS K-W PARA CADA FACTOR EVALUADO. ....	40
<b>TABLA 18.</b> RECOMENDACIONES DE SIEMBRA PARA 10 ESPECIES DE ÁRBOLES UTILIZADAS EN LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DEL CERRO EL VOLADOR.....	67

## **LISTADO DE FIGURAS**

<b>FIGURA 1.</b>	UBICACIÓN DE LAS ISLAS DE SIEMBRA EN EL CERRO EL VOLADOR.....	12
<b>FIGURA 2.</b>	DIAGRAMA DE CATEGORIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA. ....	21
<b>FIGURA 3.</b>	PORCENTAJE DE AGUA PROMEDIO CONTENIDO EN LAS CATEGORÍAS TOPOGRÁFICAS ....	25
<b>FIGURA 4.</b>	PROMEDIOS DE LA TCPA DE LOS ÁRBOLES UBICADOS EN LAS 3 CATEGORÍAS TOPOGRÁFICAS. ....	25
<b>FIGURA 5.</b>	PROMEDIOS DE LA TCPD DE LOS ÁRBOLES UBICADOS EN DIFERENTES NIVELES DE COBERTURA DE DOSEL. ....	27
<b>FIGURA 6.</b>	PROMEDIOS DE LA TCPA DE LOS ÁRBOLES UBICADOS EN DIFERENTES NIVELES DE COBERTURA DE DOSEL. ....	27
<b>FIGURA 7.</b>	PROMEDIOS DE LA TCPD DE LOS ÁRBOLES UBICADOS EN DIFERENTES NIVELES DE INCIDENCIA DE VIENTOS. ....	29
<b>FIGURA 8.</b>	PROMEDIOS DE LA TCPA DE LOS ÁRBOLES UBICADOS EN DIFERENTES NIVELES DE INCIDENCIA DE VIENTOS. ....	29
<b>FIGURA 9.</b>	PROMEDIOS DE LA TCPD DE LOS ÁRBOLES UBICADOS EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES DE FERTILIZACIÓN. ....	31
<b>FIGURA 10.</b>	PROMEDIOS DE LA TCPA DE LOS ÁRBOLES UBICADOS EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES DE FERTILIZACIÓN. ....	31

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Degradación y Restauración

Los sistemas de producción actuales, la sobreexplotación de recursos y el cambio en el uso de las tierras por el hombre han tenido grandes impactos a nivel mundial en la biodiversidad y el equilibrio natural de los ecosistemas (Dobson et al. 1997, Donald 2004, Hildebrand et al. 2005, y Sodhi et al. 2009). Bosques enteros desaparecen para dar campo a vastas extensiones de monocultivos y ganadería industrial teniendo como consecuencia la pérdida de los servicios ambientales básicos que los bosques naturales ofrecen y problemáticas tan graves como el calentamiento global (Laurance y Useche 2009, y Shearman 2009). Estos problemas no son sólo el resultado de la expansión de la frontera agropecuaria; Pauchard et al. (2006) mencionan que en los países en vía de desarrollo el crecimiento de las ciudades y el cambio en el uso de las tierras cercanas es cada vez mayor, impactando los ecosistemas naturales y los servicios ambientales que éstas les proveen. El crecimiento demográfico urbano, en general mayor que el crecimiento rural (Wright y Muller-Landau 2006), ha puesto una gran presión sobre los recursos naturales cercanos y los relictos de bosque natural, degradándolos hasta puntos en los que estas áreas pierden su utilidad y capacidad de regeneración, erosionando los suelos o permitiendo la llegada y establecimiento de especies exóticas e invasoras (McKinney 2002). Hoy son pocas las ciudades en el mundo que poseen áreas importantes en su interior con ecosistemas naturales; sin embargo muchas de ellas poseen predios que alguna vez fueron bosques y hoy se encuentran degradados.

En vista de esto, se ha concentrado mucha atención sobre los llamados ecosistemas estratégicos, siendo aquellos que proveen bienes y servicios ambientales de gran importancia para las poblaciones humanas (Márquez Calle 2003). Muchos de estos ecosistemas, y sobre todo los más cercanos a las ciudades, han sido fuertemente perturbados y explotados, deteriorando la calidad de los servicios que proveen (McKinney 2002). La importancia de los servicios ambientales que representa un área de bosque, u otro ecosistema natural cerca de la ciudad ha motivado a conservacionistas y ecólogos en todo el mundo a trabajar y desarrollar estrategias para recuperar estos espacios naturales que han sido degradados o sobreexplotados (Cairns y Heckmans 1996). También por su parte, y motivados por la popularidad de las políticas verdes, las nuevas políticas ambientales incluyen la evaluación de opciones de biorremediación. De esta manera, lo que hace 30 años ni se mencionaba hoy es una necesidad para el mundo y una obligación para sus

gobernantes. La recuperación funcional de ecosistemas degradados se ha convertido en una estrategia de conservación que ha probado ser viable y efectiva (Dobson et al. 1997). Así, dentro de este contexto, nace el concepto de restauración ecológica, hoy entendido como el proceso de asistir la regeneración y sucesión natural en ambientes degradados o que hayan sufrido perturbaciones graves para recuperar su funcionalidad, sostenibilidad e integridad como ecosistema (SER 2004). De esta manera, aplicando diferentes estrategias de manejo, según el caso evaluado pueden incluir reforestación, manejo de suelos, reintroducción de especies, entre otras, se pretende acelerar y controlar el desarrollo del ecosistema y dirigirlo hacia una meta propuesta previamente donde se consideren los servicios ambientales y funciones ecológicas que deben estar presentes para lograr un sistema funcional (Cairns y Heckmans 1996, Kiehl et al. 2010, y Ruiz-Jaen y Aide 2006).

Existen muchos ejemplos de restauraciones ecológicas exitosas en el mundo y menos reportados son los casos poco satisfactorios (Kiehl et al. 2010, Ruiz-Jaen y Aide 2005). Bradshaw (1983), y Cairns Jr y Heckmans (1996) afirmaron que la restauración ecológica sería una prueba para la ciencia de la ecología. Allí se confirmaría toda su teoría y la validez de sus postulados. Sin embargo, aunque nuestro conocimiento es cada vez más amplio en este campo, aún hay limitaciones teóricas debidas a la gran cantidad de factores - bióticos y abióticos- que intervienen en los ecosistemas y la dificultad de considerar todos sus efectos. Esto ha conllevado a que algunos proyectos de restauración sean poco exitosos y, generalmente, no se logra identificar la razón por la cual fallaron a falta de un programa completo de monitoreo y manejo adaptativo.

## **1.2. Panorama de la restauración de ecosistemas en Colombia**

En Colombia los ecosistemas naturales y sobretodo los bosques andinos han sufrido una presión devastadora producto del crecimiento poblacional y actividades como la extracción de maderas finas, la agricultura y la ganadería (Kattan y Álvarez 1996). Aún más han sufrido los ecosistemas naturales urbanos, dado el crecimiento de las ciudades producto de la realidad social de violencia y desplazamiento que ha azotado al país por más de 50 años (Tassara et al. 1999). Las consecuencias ambientales de este crecimiento se hacen más evidentes con el tiempo; deslizamientos e inundaciones son cada vez más comunes y de mayor magnitud que hace algunos años (OMM 1991). Las profundas problemáticas socio-económicas han desviado la atención y los recursos del país dejando un vacío en términos ambientales por largos

años; errores graves en estos temas, como la reforestación con Pino y Eucalipto, están mostrando sus consecuencias: acidificación del suelo, desplazamiento de la biodiversidad nativa, etc. (Andrés 2010). La realidad actual en Colombia muestra un panorama lleno de ecosistemas degradados que han perdido su funcionalidad y su capacidad de proveer los bienes y servicios ambientales que requieren las comunidades humanas urbanas.

Afortunadamente, la idea de la restauración ecológica ha tomado cada vez más fuerza en el país y por medio de individuos, organizaciones privadas y no gubernamentales y recientemente por parte del gobierno (GREUNAL 2009), se ha promovido el desarrollo de proyectos de restauración ecológica, principalmente en humedales (Andrade y Benitez-Castañeda 2005) pero también en ecosistemas terrestres (GREUNAL 2009). La mayoría de estos trabajos se han concentrado en Cundinamarca y el Valle del Cauca donde se observan excelentes resultados, pero no se limitan a estas zonas (GREUNAL 2009). En la literatura se reportan menos ejemplos de proyectos de restauración ecológica exitosos en Antioquia, sin embargo, la Secretaría de Medio Ambiente de Medellín y la Universidad de Antioquia han generado una propuesta de restauración ecológica de ecosistemas en el Parque Natural Regional Metropolitano Cerro El Volador (SMA y UdeA 2009), la primera área urbana protegida del país. Este proyecto de restauración tiene como objetivo generar información relevante para la conservación y maximizar el éxito de la recuperación de ecosistemas urbanos estratégicos del Municipio de Medellín, evaluando específicamente la pertinencia del uso de diferentes sustratos de siembra, dosis de fertilizantes o inoculación con micorrizas y el desempeño de más de 100 especies nativas.

### **1.3. Condiciones ambientales apropiadas para el establecimiento de árboles en programas de restauración ecológica.**

El éxito de los programas de restauración ecológica involucra necesariamente la capacidad del ecosistema para ser resiliente (SER 2004, Ruiz-Jaen y Aide 2005). Para lograr tal objetivo es esencial garantizar el establecimiento de la cobertura vegetal deseada, lo que puede ser medido por medio de programas de monitoreo en los que se evalúen la mortalidad, las tasas de crecimiento y la llegada de nuevas especies; pero este éxito depende en gran medida de un buen diseño, y adicionalmente, de que las especies utilizadas se desenvuelvan bien en el terreno seleccionado para ellas. Para lograr este último objetivo, es necesario considerar aspectos propios de cada especie, identificando su grupo funcional dentro de la comunidad así como identificar

sensibilidades particulares a los factores bióticos y abióticos más extremos en el terreno a restaurar.

Estas sensibilidades particulares pueden estudiarse evaluando el nicho ecológico de la especie; éste representa los rangos de un conjunto de variables bióticas y abióticas dentro de los cuales una población de dicha especie puede establecerse y sobrevivir (Smith y Smith 2001). Dentro del estudio de los nichos se pueden incluir una gran cantidad de variables, lo que se hace claro al observar cómo la heterogeneidad ambiental generada por la complejidad topográfica y edáfica, las condiciones de irrigación del suelo, la incidencia de vientos, y la disponibilidad lumínica conllevan a que las especies de árboles generen patrones de distribución en respuesta a los diferentes cambios en las condiciones bióticas y abióticas del área considerada (Clark y Clark 1992). Por esta razón es de vital importancia identificar las condiciones ambientales apropiadas para el desarrollo de las especies utilizadas en proyectos de restauración y utilizar esta información para desarrollar planes de siembra que generen menos pérdidas de individuos y tasas de crecimiento óptimas, ubicando las diferentes especies en los lugares donde cumplen con las condiciones ambientales óptimas para su desarrollo. Sin embargo, reconociendo la gran importancia que tienen la disponibilidad lumínica, hídrica y la incidencia de vientos sobre el crecimiento de las plantas y las posibilidades limitadas para medir una gran cantidad de factores igualmente importantes como las propiedades del suelo para cada uno de los árboles, nos concentraremos en estas tres variables para el presente estudio.

#### **1.4. Disponibilidad lumínica, hídrica e incidencia de vientos**

La **Disponibilidad Lumínica** es una variable sumamente importante en el desarrollo de muchas plantas a través de sus estadios de vida. La germinación, el crecimiento y la reproducción están influenciados de manera directa por este factor, que representa, por medio de la fotosíntesis la fuente de energía más importante de la mayoría de plantas. Sin embargo, cada especie ha desarrollado a través de su historia evolutiva diferentes estrategias de vida, así podemos encontrar especies que crecen óptimamente a plena exposición, otras en fuertes sombras, y otras en los diferentes niveles medios entre estos extremos; estas adaptaciones están muy relacionadas al grupo funcional de la sucesión a la que pertenezca cada especie (Valladares 1999).

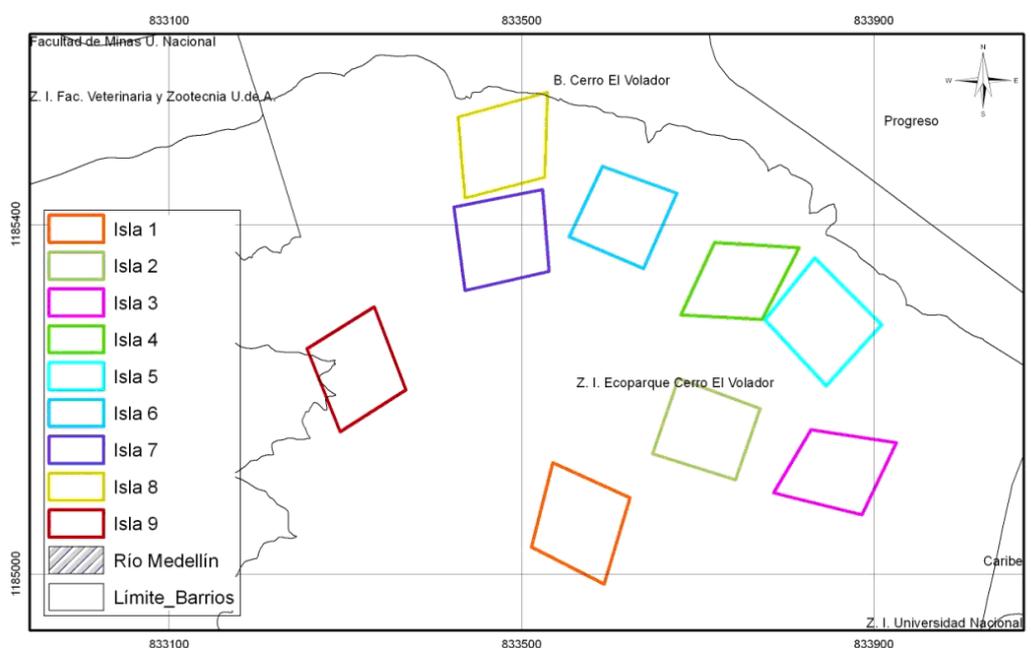
La **Disponibilidad Hídrica** representa una de las variables que más claramente determina el futuro de una planta (Riederer y Schreiber 2001). De

manera similar a como sucede con la disponibilidad lumínica, las especies han desarrollado diferentes estrategias y se han adaptado a los diferentes niveles de disponibilidad hídrica en la naturaleza (Yancey et al. 1982). Los árboles de bosque seco, por ejemplo, sobreviven sin agua por un buen tiempo, mientras que las especies del bosque de niebla requieren de una altísima disponibilidad hídrica para crecer. En la restauración ecológica generalmente se trabaja sobre un ecosistema homogéneo, por lo que las diferencias no serán tan marcadas como en el anterior ejemplo; sin embargo, variaciones en la topografía pueden generar diferentes niveles de humedad disponible. Daws et al. (2002) estudiaron la relación entre el contenido de humedad del suelo y la topografía y cómo esta relación afecta a las plantas. Entre sus conclusiones, sugieren que el contenido de agua de la parte superior de una ladera, es menor que el de la parte media y ésta a su vez, menor que el de la parte baja, efecto atribuido a la escorrentía. En respuesta, las especies vegetales se han adaptado a diferentes condiciones y cada una puede presentar una sensibilidad diferente a estas variaciones, teniendo como reacción cambios en su crecimiento o en su mortalidad (Condit et al. 1995).

La **Incidencia de Vientos** es un factor que puede limitar el crecimiento de los árboles por medio de acciones mecánicas y fisiológicas. Por ejemplo, unas fuertes corrientes de vientos pueden afectar negativamente árboles con hojas o ramas menos resistentes, en cambio un buen flujo de aire estimula el intercambio gaseoso en las hojas y promueve el crecimiento (King 1986, Smith y Ennos 2003, Wadsworth 1959). Según Zimmermann et al. (1994) las especies responden de manera diferente a la exposición a vientos de acuerdo a sus adaptaciones y su arquitectura y esto deberá tenerse en cuenta al seleccionar árboles para la restauración ecológica en áreas expuestas a vientos fuertes.

## 2. PROYECTO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL CERRO EL VOLADOR

El “Cerro El Volador” constituye la primera área urbana protegida en Colombia, que a partir del año 2009 se denominó “Parque Natural Regional Metropolitano Cerro El Volador”. Este parque se ha identificado como un ecosistema estratégico para el área metropolitana del Valle de Aburrá por los bienes y servicios ambientales que ofrece y por el significado histórico, sociocultural y natural que posee. Allí, luego de una masiva explotación maderera y uso intensivo en ganadería desde el asentamiento de los colonos, se han implementado diferentes proyectos de reforestación, inicialmente con Eucalipto y otros árboles introducidos, y posteriormente con la siembra de escasos y dispersos árboles nativos (CAA et al. 2006). Ninguno de estos proyectos se planteó como una restauración ecológica en la que se tuviese en cuenta la funcionalidad ecosistémica y aunque han generado una cierta cobertura vegetal en algunas zonas del Cerro, se considera que éste aún necesita de acciones de reforestación para su rehabilitación total.



**Figura 1.** Ubicación de las Islas de Siembra en el Cerro el Volador. (Tomado de SMA-UdeA, 2009).

Por esta razón, en el año 2008 la Secretaría de Medio Ambiente y la Universidad de Antioquia suscribieron un acuerdo marco para diseñar e implementar un modelo de restauración ecológica en el Cerro El Volador. Partiendo de esta iniciativa se sembraron 10.000 árboles de más de 100 especies nativas en 9 parcelas (islas de siembra) de aproximadamente 1 hectárea cada una, siguiendo un planteamiento experimental en el cual se

pretende evaluar el efecto de diferentes tratamientos de fertilización sobre el desempeño de los árboles a corto plazo y su monitoreo a largo plazo (SMA y UdeA 2009). El interés de la Secretaría de Medio Ambiente con este proyecto es, además, el de generar información útil sobre el uso, crecimiento y mortalidad de especies nativas en proyectos de restauración ecológica en el Valle de Aburrá para aplicarla en futuros proyectos.

Tratamiento	Componentes	Total
1 100% Dosis recomendada	70g "13-26-6" + 15g Roca P + 15g El. menores + 17.5 g Si Mg + 32.5 g Su Ca + 100g Micorrizas	250 g
2 50 % Dosis recomendada	35g "13-26-6" + 7.5 g Roca P + 7.5 g El. menores + 8.75 g Si Mg + 16.25 g Su Ca + 50g Micorrizas	135 g
3 Sólo micorrizas	100g Micorrizas	100 g
4 Control	Suelo preparado sin fertilizante.	-
5 Suelo nativo "El Volador"	Suelo nativo sin fertilizante.	-

**Tabla 1.** Composición de los tratamientos experimentales de fertilización aplicados en el proyecto de restauración ecológica del Cerro El Volador.

Dentro de la primera fase de este proyecto se aplicaron 5 tratamientos de fertilización dividiendo cada isla en cuadrantes de la siguiente manera: uno Control (Tratamiento 1), otro con micorrizas y fertilizante según las dosis recomendadas por el Manual de Silvicultura Urbana de la Secretaría de Medio Ambiente de Medellín (Tratamiento 4), otro con estos contenidos a la mitad (Tratamiento 2), uno más solamente con la dosis recomendada de micorrizas (Tratamiento 3) y el último utilizando suelo nativo tomado del Cerro El Volador (Tratamiento 5) aplicado en lugar del tratamiento Control en las islas 6, 7 y 9 (Tabla 1). Los tratamientos 1 a 4 recibieron hidroretenedor y sustrato enriquecido con materia orgánica para evaluar la importancia de los fertilizantes y las micorrizas en el crecimiento de los árboles. Aunque en el proyecto inicial se planteó continuar con estas dosis de fertilización cada 6 meses y realizar un mantenimiento (plateo o remoción de pastos y plantas alrededor del árbol sembrado) dos veces al año, por cuestiones administrativas la Secretaria de Medio Ambiente solamente ha autorizado la aplicación de fertilizantes una vez al año y tres mantenimientos.

En 2010, un año después de la siembra y el censo inicial de los árboles, llevamos a cabo el primer monitoreo, tomando medidas de diámetro y altura, reportando árboles muertos y anotando observaciones sobre el estado fitosanitario de los árboles. Los resultados obtenidos en este primer monitoreo sugieren que en el 23% de las especies hubo un efecto significativo de los tratamientos experimentales de fertilización sobre las

tasas de crecimiento proporcional en diámetro, donde la dosis recomendada aumentaba dichas tasas. Sin embargo, al analizar el efecto de las islas de siembra, se observó que éstas tenían efecto en más del 70% de las especies, siendo estos efectos diferentes para cada una. Se sugirió entonces que las condiciones ambientales de cada isla, considerablemente diferentes entre ellas, estaban teniendo un efecto de mayor intensidad sobre las tasas de crecimiento de los árboles.

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y HIPÓTESIS

#### 3.1. Planteamiento del problema

Las Islas de siembra están ubicadas en las laderas Oriental, Norte y Occidental de El Volador. Su topografía, composición y condiciones microclimáticas tienen una alta variabilidad. Particularmente, las islas 1 y 2 presentan muy poca cobertura vegetal preestablecida; la Isla 3, ubicada en una de las zonas más bajas, forma un pequeño valle donde concurren aguas de escorrentía; las Islas 4 y 5 están expuestas a los vientos y tienen muy poca cobertura vegetal. Las Islas 6, 7 y 8, presentan fuertes pendientes, cañones profundos y zonas con una cobertura de dosel considerable, mientras que la Isla 9 presenta una alta cobertura proporcionada por Urapanes (*Fraxinus chinensis* Roxb.) sembrados en El Cerro anteriormente.

Estas diferencias ambientales son visibles y los efectos que pueden estar teniendo son diversos. Por ejemplo, los vientos alisios provenientes del Nor-Noreste, principal corriente eólica del Valle de Aburrá, adquieren un poco más de velocidad debido a la topografía del valle. Los llamados “cerros tutelares”, entre los que se incluye el Cerro El Volador, reciben estas corrientes con gran intensidad, impactando sobre la capa vegetal presente (SMA et al. 2006). Este hecho puede estar influenciando de maneras diferentes el crecimiento y la mortalidad de los individuos de las especies presentes y los efectos pueden variar según su ubicación, grado de exposición y características propias de la especie.

Durante el primer monitoreo se observó que muchos árboles, la mayoría pertenecientes a las Islas ubicadas en la cara norte del cerro (Islas 4, 5 y 6), presentaban señales de deterioro o una inclinación que coincidía con la dirección percibida de los vientos, Norte-Sur; sin embargo, no todas las especies ubicadas en estos lugares presentaban estos efectos. Partiendo de estas observaciones, el comportamiento general de los vientos alisios en el Valle de Aburrá y la topografía del Cerro El Volador, concluimos que no todos los árboles están sometidos a la misma intensidad y dirección del viento y conjeturamos que el nivel de afectación depende también de la especie y su resistencia.

Similarmente, las temporadas de poca precipitación de diciembre y enero de los últimos años pueden haber afectado los árboles del proyecto, reduciendo sus tasas de crecimiento o aumentando su mortalidad. En efecto, observaciones en campo sugieren que individuos de las especies más afectadas por la limitación del recurso hídrico sobrevivieron al estar ubicadas

en zonas resguardadas con una humedad evidentemente mayor que en otros sitios.

A partir de las anteriores observaciones y recomendaciones, se diseñó el presente proyecto de investigación y se vinculó a un segundo monitoreo que se realizó en 2011 siguiendo la misma metodología del anterior e incluyendo la toma de datos necesarios para la evaluación de los efectos de 3 factores ambientales, disponibilidad lumínica, hídrica e incidencia de vientos de las 10 especies de árboles más representativas del proyecto “IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA Y FORESTAL EN EL CERRO EL VOLADOR”, y la posterior comparación con el efecto de los tratamientos de fertilización aplicados. Es importante señalar que esta investigación se desarrolló al interior de un proyecto de restauración ecológica previamente establecido que, en el momento de su planteamiento, no tenía por objetivo responder a las preguntas propuestas en este proyecto de investigación. Sin embargo, nuestro interés es explorar los patrones que pueden estar ocurriendo por efecto de los factores ambientales sobre el crecimiento de las especies utilizadas en el proyecto y elaborar una serie de recomendaciones de siembra para las especies evaluadas.

### **3.2. Hipótesis principal**

3.2.1. Las especies evaluadas tienen diferentes grados de sensibilidad al estrés hídrico, a la disponibilidad lumínica, a la incidencia de vientos, y a los tratamientos de fertilización, hechos que se ven reflejados en el crecimiento del árbol. Así, es posible identificar la respuesta de los árboles a estas condiciones evaluando sus tasas de crecimiento en los diferentes niveles de dichas variables.

### **3.3. Hipótesis derivadas**

3.3.1. La adición de fertilizantes, micorrizas y suelo preparado favorecen el crecimiento de los árboles; sin embargo, en el Cerro El Volador, la intensidad de otros factores abióticos afectan el crecimiento de algunas especies en mayor medida, impidiendo identificar el efecto de los tratamientos. Así, no será posible determinar un efecto positivo claro de los tratamientos de fertilización para las especies más sensibles a los factores ambientales.

3.3.2. Una mayor disponibilidad de agua por escorrentía tiene un efecto positivo en el crecimiento de las especies con mayor grado de sensibilidad a la escasez hídrica sembradas en el proyecto de restauración del Cerro El

Volador. Así, las especies sensibles a este factor sembradas en zonas de cañón o planicies donde se acumula el agua exhibirán mayores tasas de crecimiento que árboles ubicados en crestas y pendientes.

**3.3.3.** Una intensidad lumínica media favorece el crecimiento de los árboles de especies no pioneras sembradas en el proyecto de restauración del Cerro El Volador. Así, árboles no pioneros plantados en lugares donde predomina la sombra en el día o con exposición directa durante todo el día presentarán menores tasas de crecimiento que aquellos que reciban un balance entre luz y sombra durante el día. Así mismo, las especies pioneras tendrán mayores tasas de crecimiento a causa de la alta intensidad lumínica.

**3.3.4.** Los fuertes vientos que inciden contra el cerro El Volador afectan negativamente el crecimiento de algunas especies de árboles sembrados en el proyecto de restauración del Cerro El Volador. Así, los individuos de especies sensibles plantados en lugares resguardados del viento exhibirán mayores tasas de crecimiento y especies con menos sensibilidad no se verán afectados.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Área de estudio



**Foto 1.** Panorama desde el Parque Natural Regional Metropolitano Cerro El Volador.

El Parque Natural Regional Metropolitano Cerro el Volador es el área natural más importante de la ciudad de Medellín representando un ecosistema estratégico dentro del valle de Aburrá (Foto 1). Está ubicado en la zona centro-occidental de la ciudad, su base se encuentra a 1468 msnm, alcanzando 1628 msnm en el punto más alto.

Posee un área de 107.13 hectáreas, de las cuales 70 (65%) están destinadas a la recuperación y conservación del ecosistema. El Cerro exhibe una precipitación media anual de 1.431 mm con un comportamiento bimodal de acuerdo con la información reportada por la estación pluviométrica Miguel de Aguinaga. Se calcula una temperatura promedio de 19,4°C en la cima y de 20,5°C en la base (CAA et al. 2006) y corresponde a una zona de Bosque Húmedo Pre-Montano (bh-PM) según el sistema de clasificación de Holdridge.

Además de su importancia como ecosistema estratégico para la ciudad por los servicios ambientales que ofrece, en 1998 fue declarado como “Bien de Interés Cultural de la Nación” gracias a una serie de hallazgos arqueológicos correspondientes a sociedades prehispánicas que aún no han sido estudiados en su totalidad (CAA et al. 2006).

### 4.2. Selección de especies

Seleccionamos 10 especies de árboles (Tabla 2), considerando que éstas contarán con más de 100 individuos vivos a la fecha, y no presentarán una alta incidencia de daños mecánicos, supresión por especies invasivas o mortalidad durante el monitoreo de 2011.

<b>Especie</b>	<b>Número de árboles evaluados.</b>
<i>Caesalpinia ebano</i> H. Karst.	377
<i>Ardisia</i> sp.	308
<i>Dipteryx oleifera</i> Benth.	265
<i>Tabebuia chrysantha</i> (Jacq.) G. Nicholson	169
<i>Pithecellobium</i> sp.	161
<i>Luehea seemannii</i> Triana & Planch.	154
<i>Cariniana pyriformis</i> Miers	185
<i>Swietenia macrophylla</i> King	146
<i>Quercus humboldtii</i> Bonpl.	106
<i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) S.F. Blake	124
<b>Total</b>	<b>1995</b>

**Tabla 2.** Lista de especies seleccionadas y número de árboles evaluados en el estudio.

#### 4.3. Cálculo de tasas de crecimiento (diámetro y altura)



**Foto 2.** Medición del diámetro de los árboles con calibrador digital.

Las medidas del diámetro de los árboles se tomaron utilizando un calibrador digital (UYUSTOOLS CLD006) a 15 cm del suelo, en un lugar del tallo marcado desde el inicio del proyecto para garantizar que todas las mediciones se hicieran en el mismo punto. La altura fue tomada utilizando una vara de 2.5 m marcada cada 5 cm y se

tomó la lectura en la porción más elevada del árbol.

Para el cálculo de las tasas de crecimiento proporcional se realizó una selección de los datos eliminando aquellos árboles que registraban daños mecánicos en alguno de los dos monitoreos o supresión por especies invasivas. Igualmente se retiraron aquellos datos con tasas de crecimiento negativas, pues aunque esto es posible (Clark y Clark 1999), es difícil reconocer en cada caso si es un comportamiento real o si es generado por un daño no identificado o un error humano en la toma de datos (anteriores o actuales).

Para estimar las tasas de crecimiento anual de cada árbol aplicamos la metodología usada por Clark y Clark (1991, 2001), comparando las alturas registradas en los monitoreos de los años 2010 y 2011 modificada para obtener una medida de crecimiento proporcional que permita comparar el

desempeño entre los individuos con tallas muy diferentes. Las tasas de incremento en diámetro (D) y altura (A) se calcularon como la diferencia entre las dos medidas tomadas en los monitoreos, divididas entre la medida del primer monitoreo, divididas de nuevo entre el número de días transcurridos entre las mediciones y finalmente multiplicadas por 365 días; el resultado es expresado como porcentaje para obtener una medida de crecimiento proporcional anual de cada especie en diámetro y altura TCPD y TCPA (Fórmulas 1 y 2).

$$\frac{\left(\frac{D_2 - D_1}{D_1}\right)}{\# \text{ Días}} \times 365 \text{ Días} \times 100\%$$

**Fórmula 1.** Estimación de la Tasa de Crecimiento Proporcional Anual en Diámetro (TCPD).

$$\frac{\left(\frac{A_2 - A_1}{A_1}\right)}{\# \text{ Días}} \times 365 \text{ Días} \times 100\%$$

**Fórmula 2.** Estimación de la Tasa de Crecimiento Proporcional Anual en Altura (TCPA).

#### 4.4. Disponibilidad Hídrica

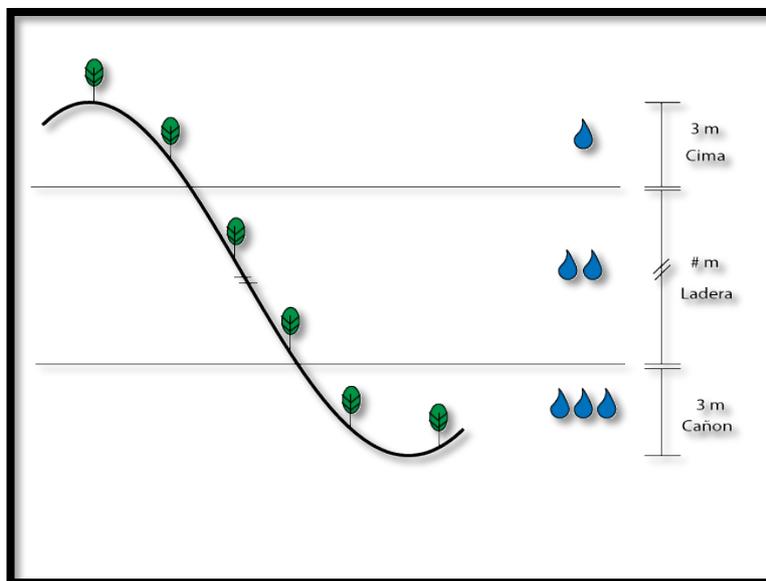
Se proponen tres categorías topográficas como estimadores de la cantidad de agua disponible en el suelo para los árboles. Para corroborar esta suposición tomamos 3 muestras de suelo en 9 sitios correspondientes a cada una de las tres categorías propuestas durante el periodo de sequía de comienzos de 2011. Las muestras fueron pesadas al momento de recolección y dejadas en bolsas de papel a temperatura ambiente durante 3 meses. Fueron pesadas una segunda vez para determinar el contenido de agua disponible y se realizaron pruebas estadísticas para confirmar si existen diferencias en el contenido de agua de las diferentes categorías.

Asignamos las categorías topográficas asociadas a niveles de disponibilidad hídrica a cada árbol según su ubicación, basándonos en los siguientes criterios y en la Figura 2:

**Cima:** aquellos árboles ubicados en una superficie expuesta y convexa respecto a una línea perpendicular a la caída de la ladera y que además presente inclinación o que al encontrarse en una cresta no se encuentre a una altura menor de tres metros de la cima.

**Ladera:** aquellos árboles ubicados en la zona de transición entre las categorías de Cuenca y Cima.

**Cañón:** aquellos árboles que se encuentran a una altura menor a 3 metros de la base de la cuenca, siendo ésta el área de recolección de aguas por escorrentía.



**Figura 2.** Diagrama de categorización de la disponibilidad hídrica.

#### 4.5. Incidencia de vientos.

Para establecer el grado de incidencia de vientos se le asignó a cada individuo una de tres categorías (Alta, Media o Baja), con base en los siguientes criterios:

**Alta:** aquellos árboles ubicados en una cara o cresta del cerro que está expuesta directamente al Norte, de donde provienen los vientos alisios y que no presentan interferencia de parte del terreno o la vegetación cercana.

**Media:** aquellos árboles ubicados en crestas expuestas al Norte pero con interferencia parcial por vegetación, en crestas no expuestas directamente a los vientos alisios pero sin protección por vegetación o en hondonadas expuestas a los vientos con cobertura vegetal parcial o nula.

**Baja:** aquellos árboles ubicados en hondonadas protegidos por vegetación que suministre una cobertura uniforme al viento y aquellos ubicados en hondonadas no expuestas a la incidencia de vientos con o sin cobertura vegetal.

## 4.6. Disponibilidad Lumínica

Para tener una idea de la intensidad lumínica que recibe cada árbol se tomaron medidas porcentuales de cobertura del dosel utilizando un densiómetro (FOREST DENSIOMETER, Robert E. Lemmon, Model A,) (Foto 3). Los datos de cobertura fueron registrados para cada individuo y posteriormente se crearon cinco categorías según los siguientes criterios:



Foto 3. Densiómetro utilizado para la estimación del porcentaje de cobertura de dosel.

**Alto:** entre 0 y 20% de cobertura de dosel.

**Medio-Alto:** entre 21 y 40% de cobertura de dosel.

**Medio:** entre 41 y 60% de cobertura de dosel.

**Medio-Bajo:** entre 61 y 80% de cobertura de dosel.

**Bajo:** entre 81 y 100% de cobertura de dosel.

## 4.7. Análisis estadístico

### 4.7.1. Contenido hídrico de las diferentes categorías topográficas

Para identificar si existen diferencias significativas en el contenido hídrico en el suelo recolectado en las diferentes categorías topográficas planteadas, realizamos una ANOVA de un factor y pruebas Post-Hoc de Tukey para diferenciar conjuntos homogéneos.

### 4.7.2. Efecto de los tratamientos de fertilización y factores abióticos

Para evaluar la presencia de efectos de los tratamientos experimentales de fertilización y de los factores abióticos sobre las tasas de crecimiento proporcional en diámetro y altura de los árboles aplicamos la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (K-W) en el paquete estadístico SPSS 19. Esta prueba permite comparar las distribuciones de las tasas de crecimiento de

cada uno de los niveles de los factores propuestos. Fueron realizadas para un modelo general, con todos los individuos de las 10 especies y posteriormente de manera individual para cada una de ellas; finalmente se realizaron pruebas Post-Hoc de Medianas, con el fin de confirmar las diferencias observadas y crear subconjuntos homogéneos que permitan observar las tendencias y diferencias de cada nivel de cada factor. En las pruebas de hipótesis usamos un nivel de significancia, o alfa, de 0,1.

## 5. RESULTADOS: EFECTO DE LOS FACTORES ABIÓTICOS

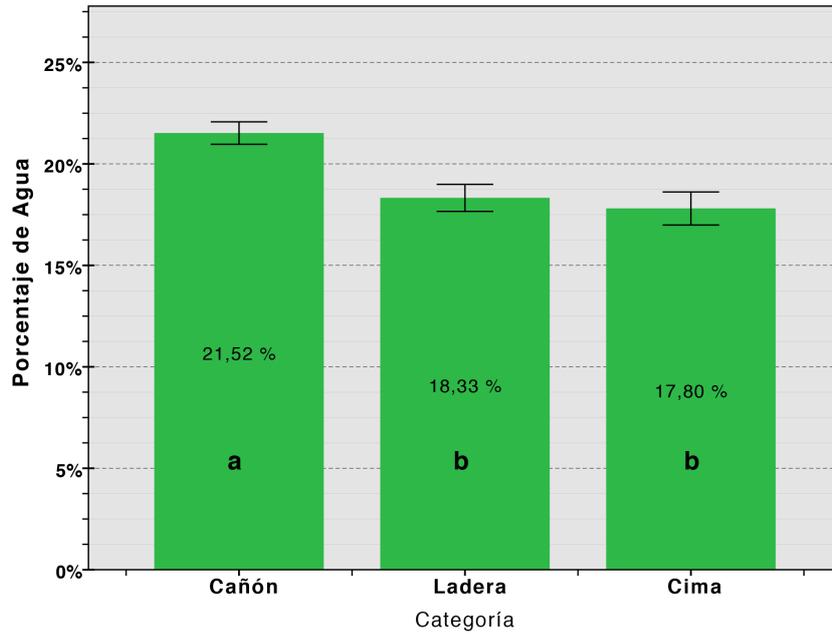
### 5.1. Resultados generales

# Árboles Sembrados	2753	<b>Pruebas K-W</b>	<b>TCPD</b>	<b>TCPA</b>
# Árboles Evaluados (n)	1995	Tratamientos de Fertilización	<0,001	0,049
Mortalidad	7,6%	Disponibilidad Lumínica	<0,001	0,037
TCPD Promedio	40,3%	Disponibilidad Hídrica	0,208	0,089
TCPA Promedio	45,2%	Incidencia de Vientos	0,006	0,003

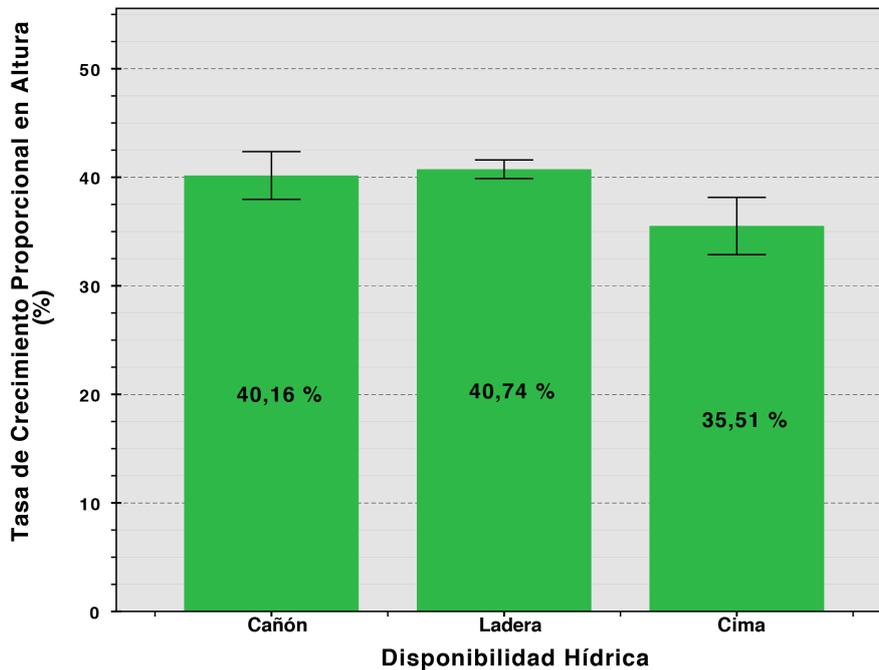
**Tabla 3.** Resumen de los resultados generales y de las pruebas K-W para el efecto de cada factor sobre las tasas de crecimiento proporcional en diámetro (TCPD) y altura (TCPA).

La mortalidad promedio de estas diez especies, desde la siembra en 2009 hasta el último monitoreo (2011), fue del 7.6%. Esta cifra varía considerablemente entre las especies pero en todos los casos permanece por debajo de la mortalidad promedio registrada para todo el proyecto de restauración (23,2%), que considera todas las especies sembradas. Las tasas de crecimiento observadas en estas 10 especies son similares a las reportadas en el monitoreo para el conjunto de árboles sembrados de todas las especies (TCPD = 42,0%, TCPA = 38,5%). Aunque la respuesta de la TCPD a la disponibilidad hídrica no es significativa, los demás factores si presentan efectos significativos sobre las tasas de crecimiento (Tabla 3).

## 5.2. Disponibilidad Hídrica



**Figura 3.** Porcentaje de agua promedio contenido en las categorías topográficas. Las letras representan medianas que son significativamente diferentes según las pruebas post-hoc.



**Figura 4.** Promedios de la TCPA de los árboles ubicados en las 3 categorías topográficas. La prueba de medianas no distingue subconjuntos homogéneos.

La evaluación de los contenidos de agua de las categorías topográficas revela que existen diferencias significativas (ANOVA,  $F=8,573$ ,  $gl=2$ ,  $p\leq 0,001$ ) entre ellos. Las pruebas post hoc agrupan las categorías en dos

subconjuntos: Cañón, con un mayor contenido de agua; y Cima y Ladera, con contenidos similares (Figura 3).

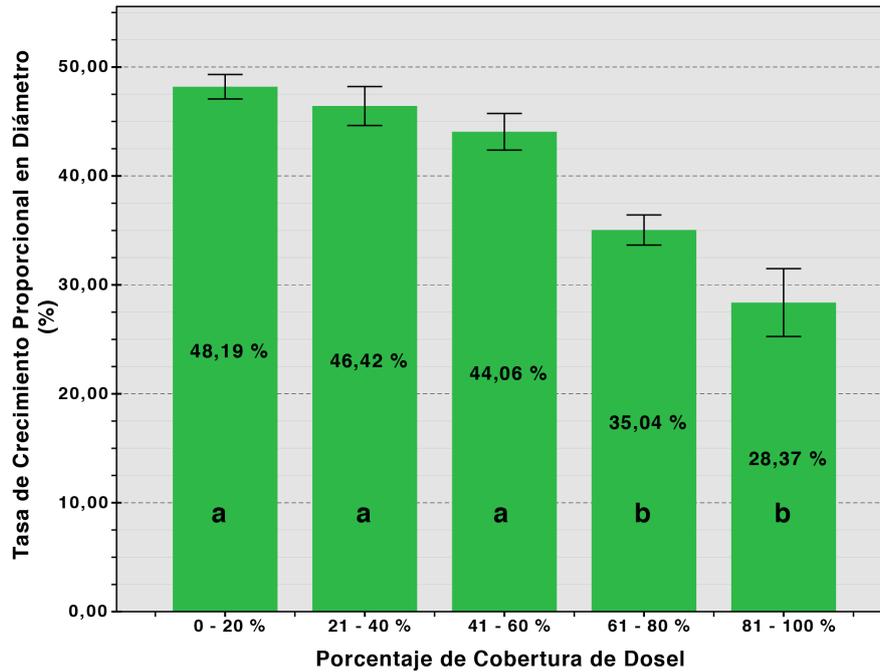
<b>Disponibilidad Hídrica</b>		
	<b>TCPD</b>	<b>TCPA</b>
<i>Caesalpinia ebano</i>	<b>0,066</b>	0,203
<i>Cariniana pyriformis</i>	0,561	<b>0,077</b>
<i>Dipteryx oleífera</i>	<b>0,078</b>	<b>0,089</b>
<i>Luehea seemannii</i>	0,256	<b>0,006</b>
<i>Pithecellobium sp.</i>	<b>0,076</b>	0,542
<b>Modelo General</b>	0,208	<b>0,089</b>

**Tabla 4.** Efectos de la disponibilidad hídrica sobre las tasas de crecimiento proporcional en diámetro (TCPD) y altura (TCPA) para las especies con valores  $P < 0,1$ .

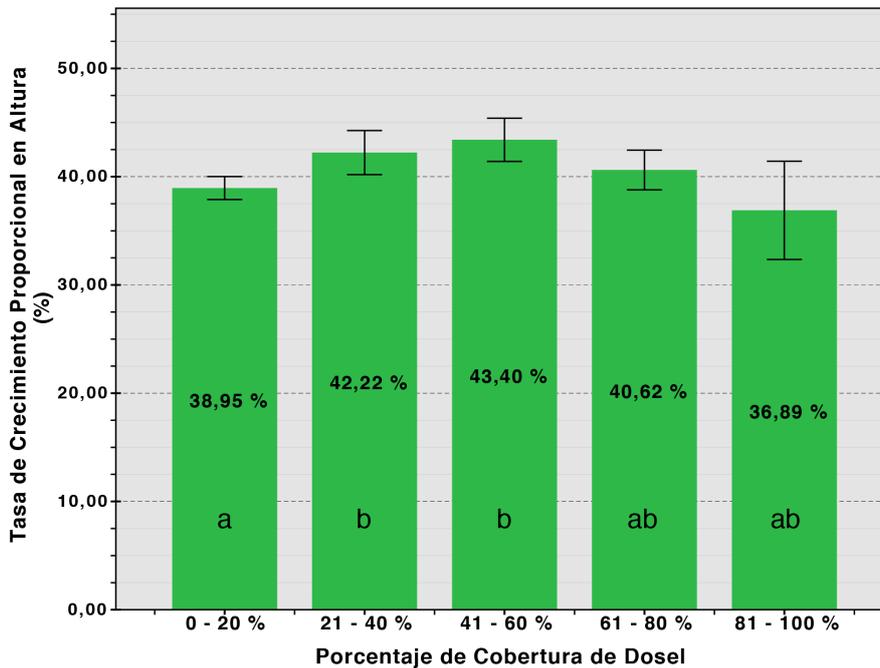
La disponibilidad hídrica presenta un efecto significativo sobre la TCPA de los árboles evaluados (K-W,  $\chi^2=4,846$ ,  $gl=2$ ,  $p=0,089$ , ) pero no parece afectar la TCPD a nivel general (Tabla 4). En la Figura 4 se observa que la categoría de cima, que representa una menor disponibilidad hídrica, exhibe un promedio de crecimiento menor que aquellos de las zonas de ladera y cañón, sin embargo, este resultado no es soportado por las pruebas post hoc que no logran identificar diferencias significativas de las medianas.

Considerando cada una de las 10 especies evaluadas, se observa que este factor tiene un efecto significativo sobre la TCPA de *C. pyriformis*, *D. oleífera* y *L. seemannii* y, adicionalmente, este efecto es significativo también sobre las TCPD de 3 especies: *C. ebano*, *D. oleífera*, y *Pithecellobium sp.*

### 5.3. Disponibilidad Lumínica



**Figura 5.** Promedios de la TCPD de los árboles ubicados en diferentes niveles de cobertura de dosel. Las letras representan medianas que son significativamente diferentes según las pruebas post-hoc.



**Figura 6.** Promedios de la TCPA de los árboles ubicados en diferentes niveles de cobertura de dosel. Las letras representan medianas que son significativamente diferentes según las pruebas post-hoc.

La disponibilidad lumínica, medida y evaluada como porcentaje de cobertura de dosel, presenta un efecto significativo sobre la TCPD (K-W,  $\chi^2=50,497$ ,  $gl=4$ ,  $p\leq 0,001$ ) y la TCPA (K-W,  $\chi^2=10,230$ ,  $gl=4$ ,  $p=0,037$ ) de los árboles sembrados (Tabla 5). En el efecto de este factor sobre la TCPD (Figura 5) se

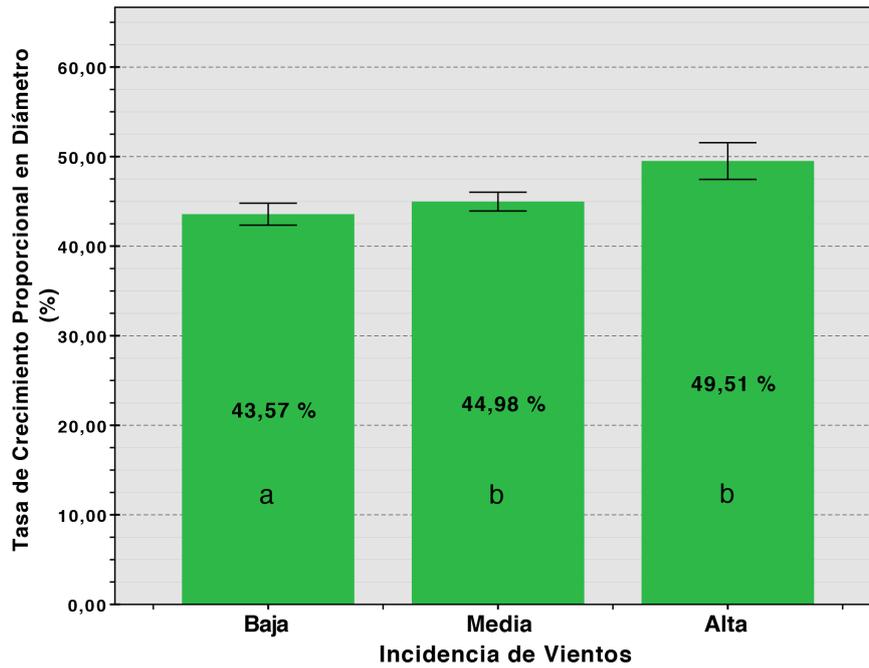
observa una relación negativa, en la que los árboles sembrados en lugares con cobertura alta y media-alta (61-100%) presentan tasas de crecimiento menores a los ubicados en lugares con un mayor grado de exposición. El efecto de la disponibilidad lumínica sobre la TCPA (Figura 6) se manifiesta de manera diferente; los individuos con una cobertura de dosel media y media-baja (21-60%) presentan una tasa de crecimiento en altura mayor que la de aquellos que se encuentran totalmente expuestos (0-20%), resultado soportado por las pruebas post hoc.

<b>Disponibilidad Lumínica</b>		
	<b>TCPD</b>	<b>TCPA</b>
<b><i>Ardisia sp.</i></b>	<b>0,001</b>	0,256
<b><i>Caesalpinia ebano</i></b>	<b>0,042</b>	0,324
<b><i>Cariniana pyriformis</i></b>	<b>0,097</b>	<b>0,043</b>
<b><i>Luehea seemannii</i></b>	0,206	<b>0,019</b>
<b><i>Quercus humboldtii</i></b>	0,476	<b>0,061</b>
<b><i>Schizolobium parahyba</i></b>	<b>0,001</b>	<b>0,008</b>
<b>Modelo General</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,037</b>

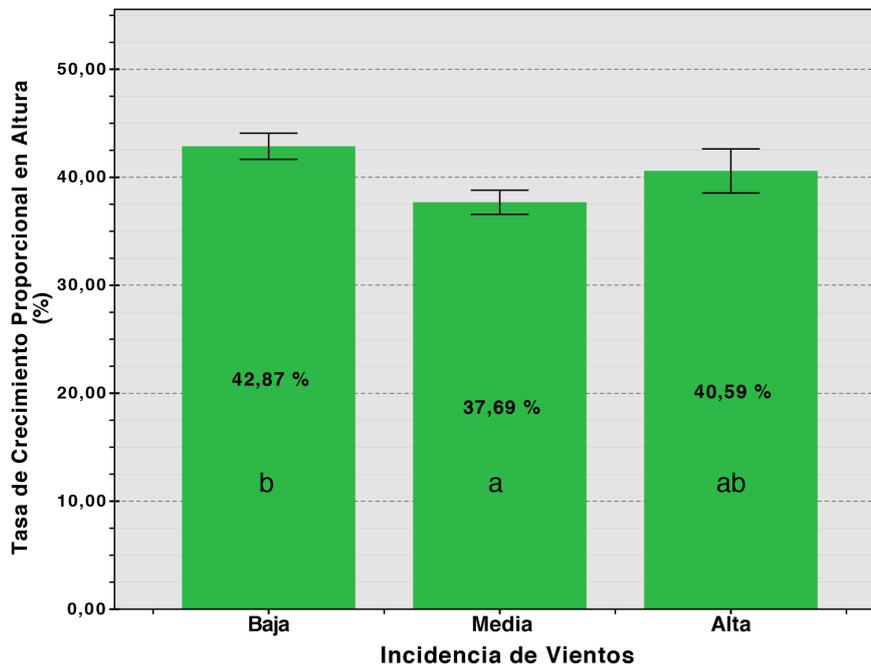
**Tabla 5.** Efectos de la disponibilidad lumínica sobre las tasas de crecimiento proporcional en diámetro (TCPD) y altura (TCPA) para las especies con valores  $P < 0,1$ .

La disponibilidad lumínica tiene un efecto significativo, según estos análisis, sobre la TCPD de cuatro especies: *Ardisia sp.*, *S. parahyba*, *C. ebano* y *C. pyriformis*. Además, este factor también tiene efectos significativos sobre la TCPA de 4 especies: *S. parahyba*, *L. seemannii*, *C. pyriformis* y *Q. humboldtii* (Tabla 5).

#### 5.4. Incidencia de Vientos



**Figura 7.** Promedios de la TCPD de los árboles ubicados en diferentes niveles de incidencia de vientos. Las letras representan medianas que son significativamente diferentes según las pruebas post-hoc.



**Figura 8.** Promedios de la TCPA de los árboles ubicados en diferentes niveles de incidencia de vientos. Las letras representan medianas que son significativamente diferentes según las pruebas post-hoc.

La incidencia de vientos presenta un efecto significativo sobre la TCPD (K-W,  $\chi^2=10,265$ ,  $gl=2$ ,  $p=0,006$ ) y la TCPA (K-W,  $\chi^2=11,981$ ,  $gl=2$ ,  $p=0,003$ ) (Tabla 6), siendo diferente para ambos casos. La TCPD de los árboles ubicados en

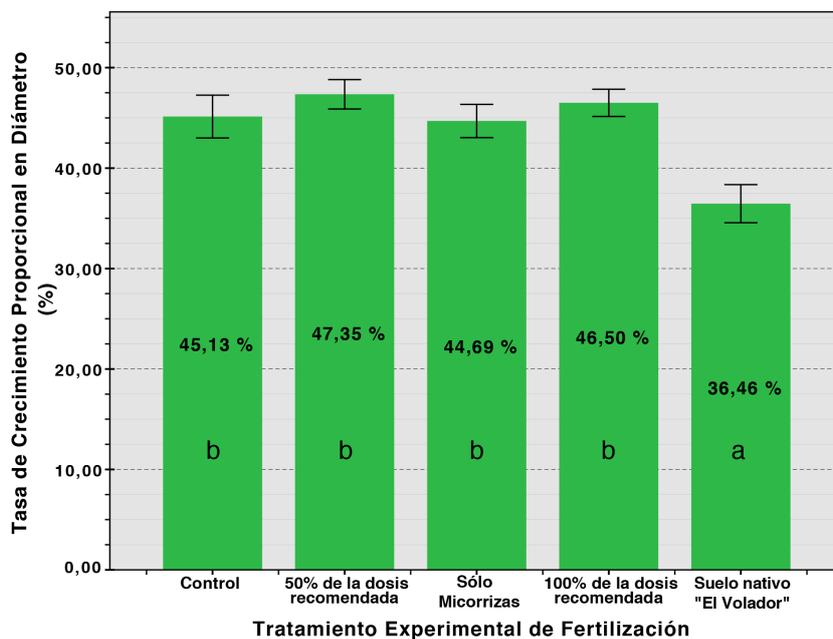
lugares con una incidencia de vientos baja es menor que la de los que están expuestos a un nivel medio o alto (Figura 7). En altura, se observa que los árboles sembrados en lugares con una incidencia de vientos baja tienen TCPA mayor a la de los árboles ubicados en lugares con una incidencia media de estos (Figura 8).

<b>Incidencia de Vientos</b>		
	<b>TCPD</b>	<b>TCPA</b>
<b><i>Ardisia sp.</i></b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,009</b>
<b><i>Caesalpinia ebano</i></b>	<b>0.057</b>	<b>&lt;0,001</b>
<b><i>Cariniana pyriformis</i></b>	<b>0.092</b>	<b>0,066</b>
<b><i>Luehea seemannii</i></b>	<b>0,895</b>	<b>0,001</b>
<b><i>Tabebuia. chrysantha</i></b>	<b>0,065</b>	<b>0,065</b>
<b>Modelo General</b>	<b>0,006</b>	<b>0,003</b>

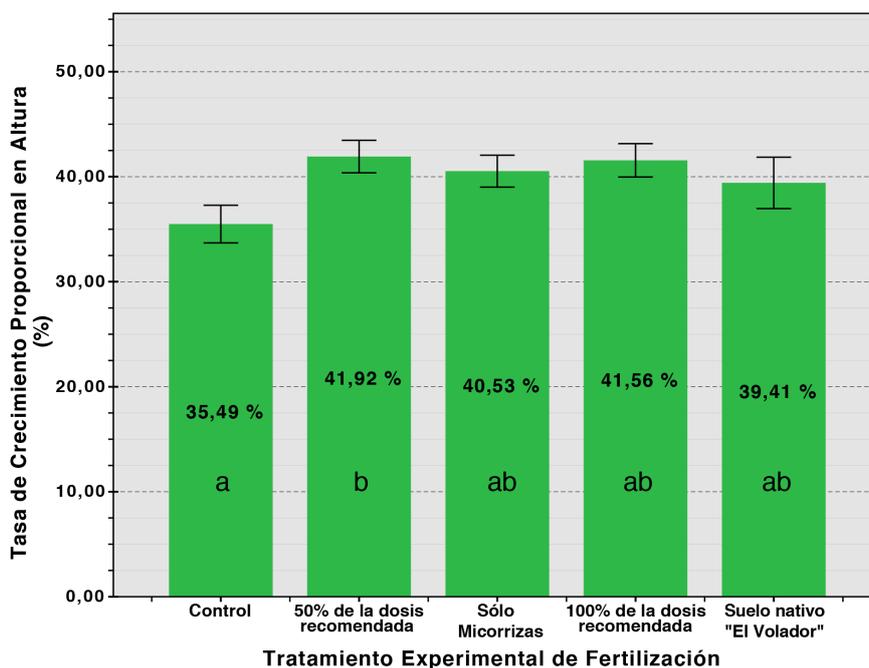
**Tabla 6.** Efectos de la incidencia de vientos sobre las tasas de crecimiento proporcional en diámetro (TCPD) y altura (TCPA) para las especies con valores  $P < 0,1$ .

Individualmente, la incidencia de vientos tiene un efecto significativo sobre la TCPD de 4 especies: *Ardisia sp.*, *C. ebano*, *C. pyriformis*, y *T. chrysantha*, y sobre la TCPA de 5 especies: *Ardisia sp.*, *C. ebano*, *L. seemannii*, *C. pyriformis* y *T. chrysantha* (Tabla 6)

## 5.5. Tratamientos Experimentales de Fertilización



**Figura 9.** Promedios de la TCPD de los árboles ubicados en los diferentes tratamientos experimentales de fertilización. Las letras representan medianas que son significativamente diferentes según las pruebas post-hoc.



**Figura 10.** Promedios de la TCPA de los árboles ubicados en los diferentes tratamientos experimentales de fertilización. Las letras representan medianas que son significativamente diferentes según las pruebas post-hoc.

Encontramos que los tratamientos experimentales de fertilización tienen un efecto significativo sobre la TCPD (K-W,  $\chi^2=21,453$ ,  $gl=4$ ,  $p\leq 0,001$ ) y TCPA (K-W,  $\chi^2=9,521$ ,  $gl=4$ ,  $p=0,049$ ) (Tabla 7) de los árboles evaluados. Los árboles sometidos al tratamiento 5, con suelo nativo del Volador, presentan

una TCPD significativamente menor que la de los demás tratamientos, entre los que ninguno se diferencia (Figura 9). Al evaluar el efecto de este factor sobre la TCPA se diferencia el tratamiento 1, Control, que presenta un promedio inferior al tratamiento 2, que utiliza el 50% de la dosis recomendada pero la prueba post hoc (Figura 10) no diferencia las medias de los demás tratamientos y cada uno de los anteriores.

<b>Tratamientos Experimentales de Fertilización</b>		
	<b>TCPD</b>	<b>TCPA</b>
<b><i>Ardisia sp.</i></b>	<b>&lt;0,001</b>	0,107
<b><i>Caesalpinia ebano</i></b>	0,506	<b>0,013</b>
<b><i>Cariniana pyriformis</i></b>	0,985	<b>0,044</b>
<b><i>Dipteryx oleífera</i></b>	<b>0,008</b>	<b>0,036</b>
<b><i>Schizolobium parahyba</i></b>	<b>0,056</b>	0,235
<b><i>Swietenia macrophylla</i></b>	0,714	<b>0,027</b>
<b><i>Tabebuia chrysantha</i></b>	0,294	<b>0,039</b>
<b>Modelo General</b>	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,049</b>

**Tabla 7.** Efectos de los tratamientos de fertilización sobre las tasas de crecimiento proporcional en diámetro (TCPD) y altura (TCPA) para las especies con valores  $P < 0,1$ .

En cuanto a especies, la TCPD de 3 de ellas, *Ardisia sp.*, *D. oleífera* y *S. parahyba*. presentaron efectos significativos de los tratamientos y 5 especies, *C. ebano*, *C. pyriformis*, *D. oleífera*, *S. macrophylla* y *T. chrysantha* presentaron efectos significativos de este factor sobre su TCPA (Tabla7).

## 6. RESULTADOS: EFECTO DE LOS FACTORES EVALUADOS SOBRE CADA ESPECIE

### 6.1. *Ardisia sp.*

# Árboles Sembrados	377
# Árboles Evaluados (n)	308
Mortalidad	3,2%
TCPD Promedio	54,1%
TCPA Promedio	53,6%

Pruebas K-W	TCPD	TCPA
Tratamientos de Fertilización	<0,001	0,107
Disponibilidad Lumínica	0,001	0,256
Disponibilidad Hídrica	0,393	0,891
Incidencia de Vientos	<0,001	0,009

**Tabla 8.** Resumen de los resultados generales de *Ardisia sp.* y valores P de las pruebas K-W para cada factor evaluado.

*Ardisia sp.* tuvo resultados generales positivos en cuanto a su crecimiento y desempeño. Presentó una baja mortalidad, y tasas de crecimiento proporcional mayores al 50%. Según las observaciones de campo, no es altamente susceptible a enfermedades o herbivoría, con sólo unos cuantos casos reportados. Adicionalmente, en la mayoría de los individuos se reportaron flores y/o frutos.

Esta especie presenta un efecto significativo de los tratamientos experimentales de fertilización (K-W,  $\chi^2=20,921$ , gl=4,  $p\leq 0,001$ ), la disponibilidad lumínica (K-W,  $\chi^2=18,434$ , gl=4,  $p=0,001$ ) y la incidencia de vientos (K-W,  $\chi^2=19,904$ , gl=2,  $p<0,001$ ) sobre su TCPD. La TCPA, en cambio, presenta efectos causados únicamente por la incidencia de vientos (K-W,  $\chi^2=9,383$ , gl=2,  $p=0,009$ ) (Tabla 8). En cuanto a la disponibilidad lumínica, las TCPD de esta especie disminuyen a medida que aumenta la cobertura del dosel (Anexo 1.2b). Finalmente, encontramos que una alta incidencia de vientos está asociada con una TCPD mayor (Anexo 1.4b); sin embargo, su TCPA es menor en los lugares con exposición media a vientos (Anexo 1.4a). La disponibilidad hídrica, según las condiciones evaluadas, no parece tener un efecto importante sobre el desarrollo de los árboles, resultado que coincide con las observaciones en campo pues no se reportó ningún individuo de *Ardisia* con ramas u hojas secas. Adicionalmente, en cuanto a los tratamientos de fertilización, se encuentra que los individuos bajo el tratamiento 5 (suelo nativo “El Volador”) tienen una TCPD promedio menor a las de los demás tratamientos (Anexo 1.1b).

## 6.2. *Caesalpinia ebano* H. Karst.

# Árboles Sembrados	479
# Árboles Evaluados (n)	377
Mortalidad	1,5%
TCPD Promedio	32,8%
TCPA Promedio	17,2%

Pruebas K-W	TCPD	TCPA
Tratamientos de Fertilización	0,506	<b>0,013</b>
Disponibilidad Lumínica	<b>0,042</b>	0,324
Disponibilidad Hídrica	<b>0,066</b>	0,203
Incidencia de Vientos	<b>0,057</b>	<b>&lt;0,001</b>

**Tabla 9.** Resumen de los resultados generales de *Caesalpinia ebano* y valores P de las pruebas K-W para cada factor evaluado.

*Caesalpinia ebano* presenta la tasa de mortalidad más baja de las 10 especies evaluadas y tasas de crecimiento moderadas. En campo no presenta alta susceptibilidad a enfermedades o herbivoría.

Esta especie presenta efectos significativos en su crecimiento causados por todos los factores evaluados. La disponibilidad lumínica (K-W,  $\chi^2=9,889$ , gl=4, p=0,042), la disponibilidad hídrica (K-W,  $\chi^2=5,423$ , gl=2, p=0,066) y la incidencia de vientos (K-W,  $\chi^2=5,739$ , gl=2, p=0,057) tienen efecto significativo sobre la TCPD de esta especie, pero no los tratamientos de fertilización. La TCPA, en cambio, presenta un efecto significativo causado por los tratamientos de fertilización (K-W,  $\chi^2=12,663$ , gl=4, p=0,013) y la incidencia de vientos (K-W,  $\chi^2=31,685$ , gl=2, p<0,001) (Tabla 9). Específicamente, los individuos sembrados en lugares con una cobertura del dosel alta y media-alta (61%-100%) presentan una TCPD menor a la de aquellos sembrados en lugares con cobertura baja a media (0%-60%) (Anexo 2.2b). Por otra parte, los individuos sembrados en lugares con una incidencia alta de vientos presentan una TCPD promedio menor que aquellos ubicados en los lugares de incidencia media (Anexo 2,4b). En el crecimiento en altura, se evidencia una mayor sensibilidad a los vientos, y se observan menores tasas de crecimiento a medida que aumenta la intensidad de estos, diferenciándose claramente los tres niveles (Anexo 2.4a).

En cuanto a los tratamientos de fertilización, se observa que los individuos sembrados en el tratamiento 1 (Control) tienen una TCPA menor a los sembrados en los tratamientos que utilizan el 50% y el 100% de la dosis recomendada (Anexo 2.1a). Los árboles sembrados en el tratamiento 3, que utilizó sólo micorrizas, presentan TCPA menores a las de los sembrados en el tratamiento 2 donde se aplicó la mitad de la dosis recomendada (Anexo 2.1b).

### 6.3. *Cariniana pyriformis* Miers

# Árboles Sembrados	301	<b>Pruebas K-W</b>	TCPD	TCPA
# Árboles Evaluados (n)	185	Tratamientos de Fertilización	0,985	<b>0,044</b>
Mortalidad	13,3%	Disponibilidad Lumínica	<b>0,097</b>	<b>0,043</b>
TCPD Promedio	26,6%	Disponibilidad Hídrica	0,561	<b>0,077</b>
TCPA Promedio	28,3%	Incidencia de Vientos	<b>0,092</b>	<b>0,066</b>

**Tabla 10.** Resumen de los resultados generales de *Cariniana pyriformis* y valores P de las pruebas K-W para cada factor evaluado.

*Cariniana pyriformis* presentó una mortalidad y tasas de crecimiento proporcional moderadas. En campo se reportaron varios casos de una posible sensibilidad a algún factor abiótico como la luz o la disponibilidad hídrica, pues presentaban hojas con un color amarillento e individuos poco vigorosos. Se observaron también casos frecuentes de herbivoría, sin embargo, no representan una afectación excesiva o una sensibilidad importante.

La TCPD de esta especie presenta un efecto significativo causado por la disponibilidad lumínica (K-W,  $\chi^2=7,862$ , gl=4, p=0,097) y los vientos (K-W,  $\chi^2=4,770$ , gl=2, p=0,092). La TCPA de esta especie, en cambio, presenta un efecto significativo causado tanto por los tratamientos de fertilización (K-W,  $\chi^2=9,775$ , gl=4, p=0,044), como por la disponibilidad lumínica (K-W,  $\chi^2=9,860$ , gl=4, p=0,043), hídrica (K-W,  $\chi^2=5,138$ , gl=2, p=0,077) e incidencia de vientos (K-W,  $\chi^2=5,436$ , gl=2, p=0,066) (Tabla 10). Los individuos sembrados en lugares con niveles de cobertura media-alta y alta (61-100%) presentan TCPD menores a los sembrados en lugares con menores niveles de cobertura (Anexo 3.2b), sin embargo, en cuanto al crecimiento en altura, los individuos que presentan una cobertura de dosel alta (81-100%) y media (41-60%) tienen TCPA promedio mayor a los sembrados en los demás niveles (Anexo 3.2a). En cuanto a la incidencia de vientos, se observa una mayor TCPD en lugares con una intensidad media (Anexo 3.4b), sin embargo, el crecimiento en altura alcanza valores promedio más altos en los árboles que presentan una menor exposición a éstos (Anexo 3.4<sup>a</sup>). Para la disponibilidad hídrica se identificó que los árboles sembrados en cañón y ladera tenían TCPA significativamente mayores a los ubicados en la cima, donde hay menor disponibilidad de agua (Anexo 3.3a).

El efecto de los tratamientos de fertilización fue poco claro, pues los individuos sembrados en el suelo nativo de El Volador (tratamiento 5) presentan TCPA mayores a las de los demás tratamientos (Anexo 3.1a), así mismo, los individuos sembrados en el tratamiento 4, con el 100% de la dosis recomendada de fertilizantes y micorrizas, y en el tratamiento 1, control,

presentan tasas TCPA promedio significativamente menores a los individuos que fueron inoculados sólo con micorrizas (tratamiento 3).

#### 6.4. *Dipteryx oleifera* Benth.

# Árboles Sembrados	345	<b>Pruebas K-W</b>	<b>TCPD</b>	<b>TCPA</b>
# Árboles Evaluados (n)	265	Tratamientos de Fertilización	<b>0,008</b>	<b>0,036</b>
Mortalidad	10,4%	Disponibilidad Lumínica	0,116	0,583
TCPD Promedio	37,9%	Disponibilidad Hídrica	<b>0,078</b>	<b>0,089</b>
TCPA Promedio	44,8%	Incidencia de Vientos	0,256	0,623

**Tabla 11.** Resumen de los resultados generales de *Dipteryx oleifera* y valores P de las pruebas K-W para cada factor evaluado.

*Dipteryx oleifera* presentó una baja mortalidad, tasas de crecimiento considerables y mayores a las presentadas en el periodo anterior, 2009-2010. En campo presenta en algunos casos daños en las hojas, posiblemente causado por el roce con plantas cercanas e invasivas.

Las tasas de crecimiento en diámetro (K-W,  $\chi^2=13,920$ , gl=4, p=0,008) y altura (K-W,  $\chi^2=10,294$ , gl=4, p=0,036) de esta especie presentan un efecto significativo causado por los tratamientos de fertilización y la disponibilidad hídrica (K-W-TCPD,  $\chi^2=5,096$ , gl=2, p=0,078; K-W-TCPA,  $\chi^2=4,828$ , gl=2, p=0,089) (Tabla 11). Los árboles sembrados en áreas de cañón presentan TCPD en promedio menores que los individuos sembrados en las laderas (Anexo 4.3b), mientras que la TCPA de los individuos sembrados en las laderas, son mayores que las de los individuos sembrados en cimas o cañones (Anexo 4.3a).

Los individuos que recibieron el 100% de la dosis recomendada de fertilizantes y micorrizas (tratamiento 4) presentaron TCPD mayores que los individuos sembrados en el suelo de El Volador (tratamiento 5), el tratamiento control (tratamiento 1) o que fueron inoculados solo con micorrizas (tratamiento 5) (Anexo 4.1b); sin embargo no se observa una diferencia clara con el tratamiento 2, (50% de la dosis recomendada) que por su parte tuvieron TCPD mayores a los que fueron sembrados en el suelo de El Volador o sólo con micorrizas. Para el crecimiento en altura, la dosis recomendada al 100% (tratamiento 4) tiene un efecto positivo considerablemente mayor que el de los demás tratamientos, y ocasiona que los individuos se desarrollen más rápido que los de los demás tratamientos experimentales de fertilización (Anexo 4.1b).

### 6.5. *Luehea seemannii* Triana & Planch.

# Árboles Sembrados	269	<b>Pruebas K-W</b>	<b>TCPD</b>	<b>TCPA</b>
# Árboles Evaluados (n)	154	Tratamientos de Fertilización	0,139	0,304
Mortalidad	7,4%	Disponibilidad Lumínica	0,206	<b>0,019</b>
TCPD Promedio	37,1%	Disponibilidad Hídrica	0,256	<b>0,006</b>
TCPA Promedio	18,6%	Incidencia de Vientos	0,895	<b>0,001</b>

**Tabla 12.** Resumen de los resultados generales de *Luehea seemannii* y valores P de las pruebas K-W para cada factor evaluado.

*Luehea seemannii* presentó una tasa de mortalidad y tasas de crecimiento moderadas a bajas. Observaciones de campo, sugieren que el pobre desempeño puede estar asociado a problemas de sensibilidad lumínica y estrés hídrico pues los árboles ubicados a la sombra y en zonas de cañón se observan más vigorosos y sanos.

La TCPD de esta especie no presenta efectos significativos asociados a ninguno de los factores evaluados pero el crecimiento en altura sí presenta fuertes efectos de los factores ambientales (K-W,  $\chi^2=11,762$ , gl=4, p=0,019, disponibilidad lumínica; K-W,  $\chi^2=10,306$ , gl=2, p=0,006, disponibilidad hídrica y; K-W,  $\chi^2=13,029$ , gl=2, p=0,001 incidencia de vientos) (Tabla 12). Los individuos que fueron sembrados en lugares con una cobertura del dosel media-alta (61-80%) presentan una TCPA hasta dos veces mayor que las de los demás niveles de exposición (Anexo 5.2a). En cuanto a la disponibilidad hídrica, los individuos ubicados en zonas de cañón tienen un promedio de crecimiento en altura considerablemente mayor a los de las laderas y las cimas, siendo las cimas los lugares con menores tasas de crecimiento proporcional en altura (Anexo 5.3a). La incidencia de viento tiene un efecto igualmente claro, donde los individuos sembrados en lugares con una intensidad de vientos baja presentaron TCPA mayores a los ubicados en lugares de intensidad de vientos media o alta (Anexo 5.4a).

### 6.6. *Pithecellobium* sp.

# Árboles Sembrados	189	<b>Pruebas K-W</b>	<b>TCPD</b>	<b>TCPA</b>
# Árboles Evaluados (n)	161	Tratamientos de Fertilización	0,179	0,920
Mortalidad	2,1%	Disponibilidad Lumínica	0,411	0,105
TCPD Promedio	71,1%	Disponibilidad Hídrica	<b>0,076</b>	0,542
TCPA Promedio	55,7%	Incidencia de Vientos	0,297	0,141

**Tabla 13.** Resumen de los resultados generales de *Pithecellobium* sp. y valores P de las pruebas K-W para cada factor evaluado.

*Pithecellobium* sp. presentó una muy baja mortalidad y tasas de crecimiento bastante elevadas, superiores al 50%. Durante los monitoreos no se reportó

herbivoría ni enfermedades en esta especie, sin embargo las podas de crecimiento pueden estar teniendo un efecto negativo en muchos de los individuos ya que reducen su área fotosintética y deforman su arquitectura arbórea natural.

Los árboles evaluados no presentan efectos significativos de ninguno de los factores abióticos o de los tratamientos de fertilización sobre la TCPA. En su crecimiento en diámetro, en cambio, éstos presentan un efecto significativo de la disponibilidad hídrica (K-W,  $\chi^2=5,166$ ,  $gl=2$ ,  $p=0,076$ ). Sugiriendo que los árboles sembrados en ladera presentan una TCPD aparentemente menores a los sembrados en cañón y cima (Anexo 6.3b)

### 6.7. *Quercus humboldtii* Bonpl.

# Árboles Sembrados	217
# Árboles Evaluados (n)	106
Mortalidad	20,7%
TCPD Promedio	42,6%
TCPA Promedio	37,2%

Pruebas K-W	TCPD	TCPA
Tratamientos de Fertilización	0,191	0,975
Disponibilidad Lumínica	0,476	<b>0,061</b>
Disponibilidad Hídrica	0,912	0,299
Incidencia de Vientos	0,108	0,438

**Tabla 14.** Resumen de los resultados generales de *Quercus humboldtii* y valores P de las pruebas K-W para cada factor evaluado.

*Quercus humboldtii* tiene un desempeño positivo y un desarrollo adecuado en el proyecto. Presentó una mortalidad más elevada a la media de las especies evaluadas, pero inferior a la mortalidad promedio de todas las especies del proyecto. Sus tasas de crecimiento son suficientemente buenas, alrededor del 40%. Según las observaciones de campo no presenta una alta susceptibilidad a enfermedades o herbivoría, siendo el estrés hídrico en combinación con los altos niveles de exposición solar factores que parecen estar afectando su crecimiento.

Esta especie no presenta alteración en su TCPD causada por ninguno de los factores evaluados. Sin embargo, presenta un efecto significativo en la TCPA causado por la disponibilidad lumínica (K-W,  $\chi^2=9,022$ ,  $gl=4$ ,  $p=0,061$ ) (Tabla14). Los individuos con un nivel de cobertura media y media-alta tienen tasas de crecimiento mayores a los individuos que están ubicados en lugares con cobertura media-baja. En el nivel alto de cobertura de dosel se produjo un error típico infinito, debido a que sólo se contó con un individuo dentro de esta categoría (Anexo7.2a).

## 6.8. *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake

# Árboles Sembrados	166	<b>Pruebas K-W</b>	
# Árboles Evaluados (n)	124	<b>Tratamientos de Fertilización</b>	<b>0,056</b> 0,235
Mortalidad	16,3%	<b>Disponibilidad Lumínica</b>	<b>0,001</b> <b>0,008</b>
TCPD Promedio	85,3%	<b>Disponibilidad Hídrica</b>	0,269 0,393
TCPA Promedio	92,8%	<b>Incidencia de Vientos</b>	0,739 0,644

**Tabla 15.** Resumen de los resultados generales de *Schizolobium parahyba* y valores P de las pruebas K-W para cada factor evaluado.

*Schizolobium parahyba* tuvo un desempeño general excelente, con altas tasas de crecimiento en promedio superiores al 80%. Sin embargo, presenta una mortalidad más elevada que la media de las especies estudiadas, pero es menor a la general del proyecto. En campo no se reportaron enfermedades o herbivoría, y por su rápido crecimiento en altura escapa con facilidad de los efectos negativos de las especies invasoras. Se observó además que los individuos localizados en zonas de menor exposición solar tenían un crecimiento muy inferior al de aquellos en zonas abiertas, sugiriendo un efecto de la disponibilidad lumínica.

Coherentemente, se encuentra que la disponibilidad lumínica tiene un efecto significativo sobre la TCPD (K-W,  $\chi^2=18,329$ , gl=4, p=0,001) y la TCPA (K-W,  $\chi^2=13,931$ , gl=4, p=0,008) (Tabla 15). Se pudo determinar además que los tratamientos de fertilización tienen también un efecto, pero sólo en el crecimiento en diámetro (K-W,  $\chi^2=9,208$ , gl=4, p=0,056). Los efectos de la disponibilidad lumínica coinciden con las observaciones de campo. Ambas tasas de crecimiento disminuyen a medida que aumenta la cobertura del dosel, haciendo que los árboles con altos niveles de exposición lumínica (0-20% de cobertura de dosel) tengan tasas de crecimiento significativamente mayores a los ubicados en lugares con niveles de exposición menores (Anexo 8.2a y b).

En cuanto a los tratamientos, se encuentra que los individuos sembrados en suelo nativo del cerro (tratamiento 5) presentan tasas de crecimiento en diámetro significativamente menores a los individuos asignados con el resto de tratamientos ( Anexo 8.1b).

### 6.9. *Swietenia macrophylla* King

# Árboles Sembrados	168
# Árboles Evaluados (n)	146
Mortalidad	3,0%
TCPD Promedio	46,4%
TCPA Promedio	46,8%

Pruebas K-W	TCPD	TCPA
Tratamientos de Fertilización	0,714	<b>0,027</b>
Disponibilidad Lumínica	0,165	0,594
Disponibilidad Hídrica	0,607	0,442
Incidencia de Vientos	0,440	0,507

**Tabla 16.** Resumen de los resultados generales de *Swietenia macrophylla* y valores P de las pruebas K-W para cada factor evaluado.

Esta especie, de alto valor comercial, presentó una muy baja mortalidad y tasas de crecimiento altas, superiores al 40%. En campo se identificaron algunos individuos con el crecimiento atrofiado, posiblemente causado por enfermedades, sin embargo el rendimiento general de *Swietenia* ha sido muy positivo.

En esta especie sólo se encontró la presencia de un efecto significativo de los tratamientos de fertilización sobre la TCPA (K-W,  $\chi^2=10,934$ , gl=4, p=0,027) (Tabla 16). Los resultados sugieren que los individuos asignados para el tratamiento 1 (control) tienen tasas de crecimiento en altura menores a los que recibieron la mitad de la dosis recomendada de fertilizantes y micorrizas (tratamiento 2) y los que tuvieron sólo micorrizas (tratamiento 3) (Anexo 9.1a).

### 6.10. *Tabebuia chrysantha* (Jacq.) G. Nicholson

# Árboles Sembrados	242
# Árboles Evaluados (n)	169
Mortalidad	5,4%
TCPD Promedio	41,9%
TCPA Promedio	36,8%

Pruebas K-W	TCPD	TCPA
Tratamientos de Fertilización	0,294	<b>0,039</b>
Disponibilidad Lumínica	0,321	0,739
Disponibilidad Hídrica	0,728	0,970
Incidencia de Vientos	<b>0,065</b>	<b>0,065</b>

**Tabla 17.** Resumen de los resultados generales de *Tabebuia chrysantha* y valores P de las pruebas K-W para cada factor evaluado.

*Tabebuia chrysantha* presentó una baja mortalidad y buenas tasas de crecimiento. En campo no se evidenció una gran susceptibilidad a herbivoría o enfermedad.

Esta especie presenta un efecto significativo de la incidencia de vientos sobre ambas tasas de crecimiento (K-W-TCPD,  $\chi^2=5,474$ , gl=2, p=0,065; K-W-TCPA,  $\chi^2=5,473$ , gl=2, p=0,065). Por su parte, los tratamientos de fertilización tienen un efecto significativo sobre la TCPA (K-W,  $\chi^2=10,081$ , gl=4, p=0,039) (Tabla 17). Las disponibilidades hídrica y lumínica no parecen tener un efecto importante en el desarrollo de *T. chrysantha*. Se determinó que los individuos sembrados en lugares con una incidencia baja de vientos presentan TCPD y

TCPA menores a los sembrados en lugares expuestos a vientos fuertes (Anexos 10.4a y b). En cuanto a los tratamientos de fertilización, se observa que los individuos que fueron sembrados bajo el tratamiento Control (tratamiento 1) presentan una TCPA menor al tratamiento que utilizó solo micorrizas, en los que no se logra evidenciar una diferencia importante (Anexo 10.1a).

## 7. DISCUSIÓN: EFECTO DE LOS FACTORES ABIÓTICOS



**Foto 4.** *Dipteryx oleifera* creciendo en la Isla 2.

Las 10 especies evaluadas presentan un desempeño adecuado y buenos resultados en términos de tasas de crecimiento y mortalidad. Esta última, al ser mucho menor que el promedio general del proyecto, sugiere la aptitud de estas especies para proyectos de restauración y una buena adaptabilidad a las condiciones del Cerro. Se espera que esta baja mortalidad y las buenas tasas de crecimiento se sostengan a través del tiempo y se logren establecer fragmentos de bosque.

Consideramos que el hecho de que las pruebas de contenido de agua en el suelo según la ubicación topográfica no hayan logrado separar las 3 categorías propuestas, puede deberse a la variabilidad en los tipos de suelo

presentes en el cerro. Este factor, tipo de suelo, no fue evaluado y sin duda tiene un efecto sobre la disponibilidad hídrica y el crecimiento de las especies (Bartens et al. 2010, Russo et al. 2005). Es posible que un muestreo en el que se controle este factor pueda revelar resultados más precisos (Daws et al. 2002). En términos de tasas de crecimiento, específicamente de la TCPA, los resultados sugieren un menor crecimiento en las cimas, que a pesar de no ser muy fuerte, es coherente con la hipótesis de que en la cima la disponibilidad hídrica es menor.

La hipótesis de que esta limitación hídrica de la cima y la alta disponibilidad en los cañones pueden afectar las tasas de crecimiento no tiene resultados con altos grados de significancia en términos generales. La poca diferenciación entre las TCPA y TCPD puede ser debida a: una hipótesis nula, en la que definitivamente no es un factor determinante; que no se ha medido correctamente; o que de acuerdo con los resultados obtenidos, pocas de las especies seleccionadas presentan una sensibilidad a este factor, que podría ser más fuerte en otras de las especies presentes en El Volador, de acuerdo a nuestras observaciones en el monitoreo,. Por ejemplo, especies como *Nageia rospigliosii*, de la cual se sembró un alto número de individuos,

presentó un altísimo grado de mortalidad y los individuos sobrevivientes, que se desarrollan adecuadamente, se presentan principalmente en zonas de cañón; por lo que podemos inferir que este factor afecta el desarrollo de algunas especies, incluso hasta el punto de afectar también su mortalidad (Hinestroza y Villegas 2011).



**Foto 5.** Proyecto de restauración ecológica en el Cerro El Volador, Isla 3, zona de valle.

La disponibilidad lumínica presentó un resultado más claro. El patrón observado en la TCPD en respuesta a este factor presenta una relación positiva, la cual sugiere que a mayor disponibilidad lumínica, mayores tasas de crecimiento; probablemente debido a una mayor tasa fotosintética. De todas formas, esta tendencia está sujeta a la selección de especies ya que

dependiendo del grupo funcional y sus adaptaciones, presentan respuestas particulares y diferentes niveles de crecimiento óptimo (Ramos y Grace 1990). La relación entre este factor y los resultados en altura sugieren una mayor tasa de crecimiento en los individuos expuestos a niveles intermedios de luminosidad, resultado similar al encontrado por Poorter (1999). Esto puede ser debido a que los árboles ubicados en zonas de cobertura de dosel media, incrementan su tasa de crecimiento en altura, a fin de alcanzar lugares con mayor exposición en el menor tiempo posible (Ballaré 1999, Devkota y Jha 2010), mientras los ubicados en lugares de baja exposición no cuentan con suficiente intensidad lumínica para generar una respuesta similar (Ramos y Grace 1990). Por su lado, los individuos sometidos a una alta disponibilidad de luz tampoco aumentan su crecimiento en altura debido a que no se genera el estímulo y la necesidad de competir en búsqueda de este recurso o bien no están adaptadas a condiciones con altos niveles de luminosidad (Ballaré 1999).

Los resultados obtenidos acerca de la relación entre la TCPD y la incidencia de vientos coinciden con los encontrados por King (1986). Este comportamiento parece ser una respuesta de fortalecimiento en función de la resistencia requerida, aumentando su crecimiento en diámetro al estar sometidos a vientos más intensos con un trade off de su crecimiento en altura. Sin embargo, esta tendencia no se observa en todas las especies, donde algunas como *Caesalpinia* y *Cariniana* presentan una mayor sensibilidad y su crecimiento es mayor en niveles medios con una disminución de sus TCPD en el nivel de alta incidencia. En cuanto a su

respuesta en altura, la respuesta general obtenida no parece explicar un patrón razonable en reacción a los vientos y puede estar siendo provocado por las diferentes respuestas de las especies, donde se observan algunas tolerantes y otras altamente sensibles.

La respuesta a los tratamientos de fertilización, en cuanto al crecimiento en diámetro, tiene dos posibles explicaciones. Los tratamientos 1 a 4 tienen en común el uso de un suelo preparado, con hidrotenedores y materia orgánica, que no se utilizó en el tratamiento 5. Aparentemente, esta preparación es suficiente para marcar una diferencia en el crecimiento de los árboles (Häger 2010), que se ven favorecidos por un suelo en mejores condiciones que el propio de El Volador, que además se encuentra altamente degradado. El crecimiento en altura, en cambio, contradice este resultado. El patrón observado podría ser interpretado en función de las micorrizas, suponiendo que el suelo nativo las presenta, pero esta respuesta es poco probable dado que los árboles, que provenían de viveros, podían traer también micorrizas ya establecidas en sus raíces, estando también presentes en el tratamiento control. El patrón observado puede deberse entonces, a una mezcla de respuestas de las diferentes especies o a una mayor intensidad de otros factores ambientales que se correlacionen con la ubicación de los tratamientos enmascarando sus efectos.

## 8. DISCUSIÓN: EFECTO DE LOS FACTORES EVALUADOS SOBRE CADA ESPECIE

### 8.1. *Ardisia sp.*



Foto 6. *Ardisia sp.*

El desempeño de *Ardisia sp.* en el proyecto es excelente. Los individuos se ven generalmente vigorosos y en buen estado, evidenciando una adecuada adaptación a las condiciones de El Cerro que se manifiesta en su baja mortalidad, en sus tasas de crecimiento y en la poca incidencia de enfermedades y herbivoría. Es una planta precoz que, poco tiempo después de sembrada, produce frutos abundantes que pueden representar alimento para las especies animales del bosque y prometen una rápida generación de plántulas lo que la convierte en una especie con potencial para la restauración (Pascarella, 1998; Ruiz-Jaen y Aide, 2005), a pesar de que

no forma un dosel amplio y no alcanza una altura considerable.

Esta especie confirma los resultados generales observados sobre los tratamientos, en los que se observa que el tratamiento 5, con suelo nativo de El Volador, puede tener un menor contenido de materia orgánica o una composición del suelo que provoca una disminución en las tasas de crecimiento en diámetro, pues el tratamiento control no se diferencia de los demás tratamientos. Sin embargo, los tratamientos no afectan el crecimiento en altura, sugiriendo que su efecto sobre el desarrollo general de la especie no es tan fuerte (Anexo 1.1a y b).

Igualmente, el crecimiento de esta especie no es homogéneo en las condiciones ambientales evaluadas; ésta y otras especies de *Ardisia*, son plantas de sotobosque que crecen mejor en condiciones de sombra (Pascarella 1998, Zheng y Min 1998), pero los resultados obtenidos no coinciden con esta característica, observándose que el crecimiento en diámetro es mayor en los individuos sembrados en lugares con baja

cobertura de dosel (Anexo 1.2b). En altura, este comportamiento fue menos claro y no se detectaron diferencias significativas en campo; sin embargo, al analizar el Anexo 1.2a, se observa que los individuos sembrados en lugares con una cobertura de dosel alta crecieron en menor proporción que los demás (Zhong et al. 2011). A pesar de esto, los árboles que crecen en lugares con sombra se ven en buen estado también indicando que esta especie no-pionera se comporta razonablemente bien fuera de su medio ideal del sotobosque y que su rango es suficientemente amplio en este sentido para utilizarla en restauración, teniendo un mejor crecimiento en plena exposición.

El efecto de los vientos se ve reflejado sobre el crecimiento de esta especie tanto en diámetro como en altura. En la TCPD se observa la tendencia general, donde los individuos sometidos a vientos fuertes presentan un mayor crecimiento diametral (Anexo 1.4b). Este comportamiento podría asociarse a una respuesta fisiológica de compensación, fortaleciendo el tallo principal para resistir las fuerzas mecánicas provocadas por los vientos (King 1986, Bezona et al. 2009). Sin embargo, en el comportamiento del crecimiento en altura, no se observa un patrón de respuesta a vientos que pueda ser explicado por medio de un proceso biológico y puede estar asociado a una correlación con otros factores no medidos en el proyecto (Anexo 1.4a).

Durante la revisión bibliográfica de la ecología de esta especie, y analizando fotografías y muestras de herbario, consideramos que se trata realmente de *Ardisia elliptica* Thun. Esta planta, de origen asiático e introducida como ornamental, ha sido reportada como fuertemente invasiva en Hawaii, Florida y Puerto Rico (Pascarella 1997, 1998, Ruiz-Jaen y Aide 2006). Su alta



Foto 7. Floración y hojas de *Ardisia* sp.

producción de semillas, efecto de una alta proporción de autogamia y autofertilización, trae como consecuencia una gran cantidad de plántulas exitosas capaces de poblar amplias superficies de terrenos con una alta humedad como pantanos y manglares (Pascarella, 1997; Pascarella y Horvitz 1998). Esta evidencia señala la importancia de tener clara la taxonomía de las especies utilizadas en este tipo de proyectos, donde la ecología de las especies juega un papel importante en la recuperación del ecosistema. En este caso, la introducción de otra especie invasiva en el ecosistema altamente degradado de El Volador puede representar un despropósito y ocasionar un grave desbalance ambiental. Sin embargo, la predilección de

esta especie por hábitats muy húmedos para su germinación podría prevenir un comportamiento invasivo en las tierras bien drenadas de El Cerro, situación que podría estar ocurriendo pues no se han observado aún plántulas de esta especie en las islas de siembra. Así, consideramos que aunque esta especie tiene un desempeño muy positivo y una oferta de servicios ecosistémicos valiosa, no es recomendable utilizarla para proyectos de restauración dado su carácter de exótica y comportamiento invasivo reportado.

## 8.2. *Caesalpinia ebano* H. Karst.



Foto 8. *Caesalpinia ebano*

Esta leguminosa presente en los bosques secos tropicales de Colombia (Tropicos.org 2009, IAVH 1998) y de importancia económica por su madera (Botero y De la Ossa 2010), resulta apropiada para proyectos de restauración similares a éste, ya que presenta la tasa de mortalidad más baja de las especies evaluadas. Si bien su TCPA es baja en comparación con otras, puede deberse a que estos árboles tenían ya una altura considerable en el momento de la siembra; esto significa que una tasa de crecimiento neta suficientemente buena puede no reflejarse en la tasa de crecimiento proporcional. El crecimiento en diámetro, sin embargo, es bueno y refleja un buen desempeño general y una correcta adaptación a las condiciones de El Cerro.

Esta especie no presenta una respuesta muy clara a los tratamientos de fertilización (Anexo 2.1 a y b). Su crecimiento en diámetro no se ve afectado por ninguno de los tratamientos aplicados mientras que en altura, su crecimiento es mejor en los tratamientos que presentan alguna adición de fertilizante (2 y 4) que en el tratamiento Control. Sin embargo, los árboles en los que se utilizó el suelo nativo de El Volador presentan un crecimiento comparable al de todos los demás tratamientos. Este hecho puede sugerir que la adición de fertilizantes no es determinante en el crecimiento de esta especie, que puede estar asociado a otras condiciones que coinciden con la distribución espacial de los tratamientos en las Islas.

La relación del crecimiento en diámetro con la disponibilidad lumínica (Anexo 2.2b) confirman nuestras predicciones para esta especie, que, adaptada al bosque seco, crece con mayor rapidez en lugares expuestos a una alta o media radiación lumínica (0-60% de cobertura de dosel) pero disminuyendo su tasa de crecimiento bajo una cobertura media-alta y alta (61-100%). A pesar de que estadísticamente no se observó una relación del crecimiento en altura con la disponibilidad lumínica, en el Anexo 2.2a se observa una

tendencia que sugiere un crecimiento óptimo en los niveles medios de cobertura de dosel lo que puede estar asociado a una respuesta de la planta buscando sobrepasar el dosel y alcanzar la plena exposición.

La disponibilidad de agua es un factor que puede afectar notablemente el crecimiento de esta planta. Si bien sólo evidenciamos un efecto estadísticamente significativo de esta variable sobre el crecimiento en diámetro (Anexo 2.3b), la TCPA muestra también una tendencia similar (Anexo 2.3a) sugiriendo que, aunque esta especie está adaptada al bosque seco, contar con una buena disponibilidad hídrica resulta en tasas de crecimiento aumentadas.

El viento es quizás el factor abiótico que más afecta el crecimiento de *Caesalpinia ebano*. Los resultados indican que esta especie no es una buena tolerante de vientos, y en la categoría de alta incidencia de vientos los árboles presentan una TCPA hasta 3 veces menor que en el nivel de vientos bajos (Anexo 2.4a) a diferencia del crecimiento en diámetro donde el comportamiento no es tan claro (Anexo 2.4b), presentando una TCPD ligeramente superior en la categoría intermedia.



**Foto 9.** Detalle de las hojas de *Caesalpinia ebano*.

En conclusión, el ébano sobrevive en un amplio rango de condiciones ambientales pero su crecimiento no es óptimo en todas ellas y es conveniente tener esto en cuenta para lograr buenas tasas de crecimiento. Así, recomendamos ubicarlo en lugares con una baja incidencia de vientos para garantizar un buen crecimiento en altura; una cobertura de dosel

media es óptima, porque estimula su crecimiento en altura, pero esta especie también soporta una exposición alta; y un lugar con buena disponibilidad hídrica potencia también su crecimiento a pesar de tolerar las condiciones típicas del bosque seco. Podemos recomendar esta especie para proyectos de restauración ecológica en ambientes similares al Cerro El Volador, pues es una especie que se desarrolla de forma satisfactoria y representa una especie con valor ecológico, como leguminosa fijadora de nitrógeno, y comercial, por su madera.

### 8.3. *Cariniana pyriformis* Miers



Foto 10. *Cariniana pyriformis*.

El Abarco es propio de bosques en estadios sucesionales avanzados y se encuentra clasificado en estado crítico de conservación debido a la sobreexplotación para usos maderables (Galeano et al. 2006). Esta especie no tuvo un desempeño destacado, con una mortalidad que sobresale entre las especies evaluadas, aproximándose al doble del promedio de éstas. Sus tasas de crecimiento promedio son también poco alentadoras y en campo el estado general de la mayoría de los árboles sugiere una alta sensibilidad a factores abióticos, habiendo muy pocos de ellos ubicados en lugares de condiciones óptimas.

El efecto de los tratamientos de fertilización, a pesar de ser estadísticamente significativo (Anexos 3.1a y b), no coincide con las predicciones o las tendencias generales sugiriendo que el efecto observado puede ser producto de una correlación con otros factores y no revelar una respuesta biológica coherente con éstos. Consideramos que el efecto de los tratamientos de fertilización no es lo suficientemente fuerte y que los factores abióticos afectan en mayor medida el desempeño de esta especie.

Por ejemplo, observamos que una baja disponibilidad lumínica (61-100% de cobertura de dosel) tiene un efecto negativo sobre el crecimiento en diámetro de esta especie (Anexo 3.2b), y un crecimiento en altura óptimo en niveles medios de cobertura (41-60%) (Anexo 3.2a). Este comportamiento es normal en especies no-pioneras que alcanzan el dosel en bosques maduros en las que la búsqueda de luz favorece el crecimiento en altura (Poorter 1999).

La disponibilidad hídrica puede ser el factor más importante a considerar para esta especie. La clara respuesta de los árboles ubicados en cima, con una TCPA hasta 50% menor que las de cañón o ladera (Anexo 3.3a) sugieren que el Abarco es una especie con fuertes requerimientos hídricos y condiciones en general más húmedas similares a las de los bosques húmedos y muy húmedos tropicales, de los cuales proviene (Tropicos.org, 2009).

*Cariniana* es particularmente sensible a los vientos fuertes y tanto su crecimiento en diámetro como en altura se ve afectado negativamente por estos. Presentando una respuesta diferente a la observada en el modelo general, el crecimiento en diámetro del Abarco se favorece con una intensidad media de vientos, pero se reduce dramáticamente en las zonas con mayor incidencia (Anexo 3.4b), señalando una alta sensibilidad a este factor. Esta sensibilidad es más clara aún en su tasa de crecimiento en altura, donde ésta se ve afectada negativamente incluso por la intensidad media (Anexo 3.4a).



Foto 11. Detalle de las hojas de *Cariniana pyriformis*.

El bajo nivel de éxito de esta especie puede explicarse con facilidad por las condiciones necesarias para su óptimo desarrollo, que no son las más frecuentes en el Cerro El Volador. El Abarco se desarrolla mejor en los lugares que logran simular las condiciones ambientales del bosque húmedo maduro, resguardada del viento y con una alta disponibilidad hídrica. Sin

embargo, establecer una población funcional de Abarcos en El Volador constituye un aporte valioso a la conservación de la especie, además de representar un valor comercial en el proyecto para un aprovechamiento sostenible a futuro de su madera y semillas; es necesario entonces, sembrarla teniendo en cuenta sus requerimientos ambientales para asegurar su sobrevivencia y adecuado desarrollo.

#### 8.4. *Dipteryx oleifera* Benth

Este árbol, conocido como Choibá, es una excelente especie para complementar la flora de El Volador. Propio de bosques húmedos y muy húmedos tropicales, se encuentra actualmente en estado de conservación vulnerable y posee un gran potencial económico debido a los altos contenidos de aceites comestibles, madera resistente y el gran tamaño que alcanzan los individuos adultos (López y Montero 2006; Clark y Clark, 1992). Además, sus semillas son consumidas y dispersadas por murciélagos y vertebrados terrestres, es fijadora de nitrógeno y representa un excelente modelo de estudio, pues se conocen muchos detalles de su ecología (Ruiz et al. 2010).



Foto 12. *Dipteryx oleifera*.

Esta especie tiene una respuesta notable a los tratamientos de fertilización, viéndose favorecida en su crecimiento en altura y diámetro por la aplicación de la dosis recomendada de fertilizante (tratamiento 4) (Anexos 4.1a y b). Este resultado coincide con la predicción básica del experimento de fertilización y parece ser la única especie en la que se observa este comportamiento, sugiriendo que *D. oleifera* tiene una demanda de nutrientes mayor a la ofrecida en los demás tratamientos.

Aunque no fue estadísticamente significativo, el efecto de la disponibilidad lumínica sobre el crecimiento de esta especie parece claro; las gráficas muestran tasas de crecimiento reducidas, en diámetro y altura, para los niveles de mayor cobertura de dosel (Anexos 4.2a y b). Sin embargo, se observa un amplio rango de cobertura en el cual se desempeña satisfactoriamente. De acuerdo con las observaciones de campo, un nivel medio de exposición solar parece ser el óptimo que favorece el crecimiento. Estos resultados son similares a los observados en plántulas de esta especie por Clark y Clark en 1992.

Si bien la prueba estadística señala que los individuos ubicados en laderas presentan tasas de crecimiento en diámetro y altura superiores (Anexos 4.3a y b), no creemos que los niveles de sensibilidad de la especie para este factor sean tan restringidos en el punto medio, pues el rango total de

humedad evaluado tampoco es muy amplio. Este resultado nos conduce a pensar que se trata de una correlación con alguna otra característica ambiental, más que por la humedad presente. Por ejemplo, sabemos que los cañones del cerro generalmente tienen una menor disponibilidad lumínica, que como se mencionó anteriormente, puede limitar el crecimiento de *D. oleifera*.

El desarrollo de esta especie es igualmente bueno en los diferentes niveles de viento evaluados, sin embargo, en campo observamos que el ápice de estos árboles es bastante sensible al roce con los altos pastos que ocurren como especies invasoras en El Cerro. Durante el primer monitoreo, periodo en el cual no se realizó mantenimiento, no se observaron altas tasas de crecimiento en altura (Hinestroza y Villegas 2010) y el efecto del roce fue evidente. Sin embargo, en 2011, la mayoría de los individuos presentaron altas tasas de crecimiento en altura, superando, en muchos casos, a los pastos que actualmente están siendo controlados por el mantenimiento.



Foto 13. Detalle de la hoja de *Dipteryx oleifera*.

Consideramos entonces que el Choibá es una especie promisoría para la restauración de El Volador que además presenta la posibilidad de un aprovechamiento sostenible. Estos árboles están creciendo a buen ritmo y constituyen un elemento importante del ecosistema. De acuerdo con los resultados discutidos, recomendamos aplicar a esta especie el 100% de la dosis de fertilizantes propuesta en el Manual de Silvicultura Urbana y consideramos que puede ser sembrada en condiciones de luminosidad alta a media-baja y en todos los niveles de incidencia de vientos. Sin embargo, para el correcto crecimiento de estos árboles, es necesario controlar los pastos invasivos por medio de mantenimientos

durante las primeras etapas del crecimiento, hasta que los árboles superen la altura de estos.

### 8.5. *Luehea seemannii* Triana & Planch.



Foto 14. *Luehea seemannii*.

El Guácimo Colorado es una especie pionera, propia de centro y sur América, que coloniza rápidamente los claros en bosques tropicales de tierras bajas (Lang y Knight 1983). Con una mortalidad semejante al promedio de las demás, esta especie se muestra como resistente, aunque en El Cerro se pueden observar individuos suprimidos o con poco vigor. Así, su TCPA promedio es muy baja en comparación con las otras y su crecimiento en diámetro también se encuentra por debajo del promedio. Las observaciones en campo sugieren que *Luehea* se ve afectada negativamente al estar expuesta a altos niveles de radiación solar o en lugares con poca disponibilidad hídrica.

*L. seemannii* presenta un comportamiento interesante. Su respuesta a los tratamientos de fertilización no es significativa y no presenta un patrón que demuestre un efecto de estos sobre su crecimiento en altura o diámetro (Anexo 5.1a y b). De hecho, su TCPD no presenta un efecto de ninguno de los factores evaluados, pero los efectos de los tres factores abióticos sobre su TCPA son fuertes. Por ejemplo, las diferencias observadas en las tasas de crecimiento en altura de cada nivel de cobertura de dosel, sugieren un rango óptimo muy reducido, adaptada a unas condiciones de baja exposición (Anexos 5.2a). Dalling et al. (1999) encontraron un comportamiento similar, pero evaluado de manera diferente, al comparar el éxito de colonización de un claro de acuerdo al tamaño del mismo, y por consiguiente, la disponibilidad lumínica. En campo se evidenció un mejor estado de las plantas ubicadas en lugares sombreados, con un mayor número de hojas que además eran más verdes y grandes.

Los resultados del análisis de disponibilidad hídrica obtenidos (Anexos 5.3a y b) coinciden con las observaciones de campo. Se confirma la dependencia de esta especie a lugares con una alta disponibilidad hídrica, con un crecimiento en cañones hasta 4 veces mayor que el observado en las cimas y un crecimiento intermedio en las laderas. Igualmente, el efecto de la incidencia

de vientos (Anexo 5.4a y b) muestra la predilección por lugares resguardados con intensidad de vientos baja, evidenciando una reducción de hasta el 50% de su crecimiento en los demás niveles evaluados.



Foto 15. Detalle de la hoja de *Luehea seemannii*.

Estos resultados confirman las descripciones de *L. seemannii* como una especie pionera adaptada para establecerse en pequeños claros de bosque (Dalling et al. 1999), lugares donde las condiciones ambientales son similares a las descritas anteriormente. Así, esta especie, con requerimientos tan específicos, es poco versátil para su uso en restauración ecológica, pues su

éxito en los lugares más degradados será limitado. De cualquier manera, esta especie ha sido propuesta para proyectos de restauración por otros como una especie esciófila, ideal para enriquecer los proyectos una vez que las especies pioneras, más resistentes, heliófilas, han generado condiciones microclimáticas adecuadas (Yepes y Villa, 2011). Nuestra recomendación es la misma, pues actualmente, la mayoría de individuos sembrados en El Volador en campo abierto no presentan un desempeño satisfactorio.

## 8.6. *Pithecellobium sp.*

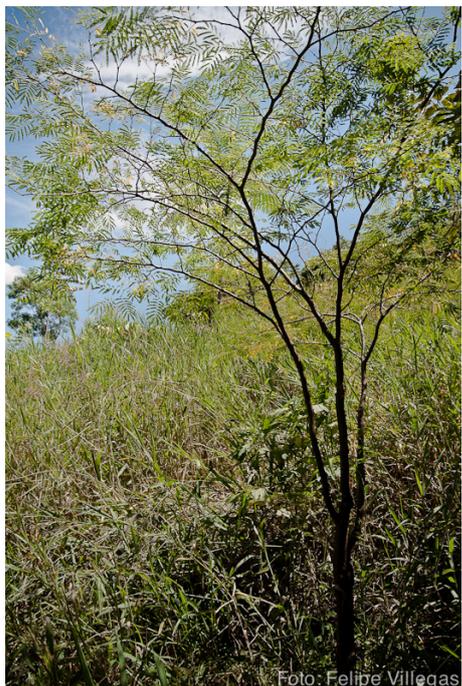


Foto 16. *Pithecellobium sp.*

Esta especie, conocida como Parasiempre, exhibe un gran desempeño con una de las más bajas tasas de mortalidad y de las más altas tasas de crecimiento (Tabla 13). Su arquitectura le permite formar una copa rápidamente, generando sombra a su alrededor, lo que ayuda a controlar el crecimiento de especies invasivas de alta exposición y a restaurar las condiciones del suelo en el cual además fija nitrógeno. Proveniente de bosques secos y zonas con condiciones menos favorables, *Pithecellobium* sólo se vio afectado significativamente por la disponibilidad hídrica, manifestada sobre su TCPD, relación en la cual no se observa un patrón claro que pueda relacionarse con los niveles

de disponibilidad hídrica (Anexo 6.3b). Es de suponer que los resultados observados obedecen a artefactos del diseño estadístico o a un factor biótico o abiótico no evaluado. Sin embargo, la TCPA de los individuos ubicados en las cimas parece ser mayor que los demás a pesar de no presentar significancia estadística, sugiriendo una preferencia por suelos más drenados (Anexo 6.3a).

Se observan también algunas tendencias en las tasas de crecimiento de esta especie para los otros factores evaluados aunque ninguno presenta significancia estadística. El tratamiento 2, con el 50% de fertilizante, por ejemplo, puede estar favoreciendo el crecimiento en diámetro (Anexo 6.1b) a comparación de los tratamientos 1 y 5. Por otra parte, una alta incidencia de vientos parece tener un leve efecto positivo en el crecimiento en altura de esta especie (Anexo 6.4a), que además se favorece de una alta exposición lumínica para su crecimiento en diámetro y altura (Anexos 6.2a y b).



Foto: Felipe Villegas

Foto 17. Detalle de la hoja de *Pithecellobium sp.*

Estos resultados soportan el uso de esta especie en lugares con condiciones similares al bosque seco, convirtiéndola en una útil herramienta para la restauración ecológica en zonas de poca disponibilidad hídrica y alta incidencia de vientos, condiciones que desfavorecen el desarrollo de muchas de las especies utilizadas en el proyecto. Lo anteriormente mencionado, en conjunto con su arquitectura, sus altas tasas de crecimiento y baja mortalidad, convierten a esta especie en una pieza clave para realizar proyectos de restauración en lugares similares a El Volador.

### 8.7. *Quercus humboldtii* Bonpl.



Foto 18. *Quercus humboldtii*.  
Individuo con hojas cloróticas.

El Roble es una especie de bosques montanos que se encuentra en estado de conservación vulnerable. Generalmente se encuentra en sitios un poco más altos que el Cerro El Volador, en condiciones más húmedas y de menor temperatura (Cárdenas y Salinas, 2006); sin embargo, su desempeño allí ha sido interesante y ha sorprendido. Aunque presenta la mortalidad más alta de las especies evaluadas, ésta sigue siendo inferior al promedio general del proyecto (23.6%) y sus tasas de crecimiento promedio son alentadoras. En general los individuos se observan sanos, con excepciones, y algunos de ellos alcanzando tallas de hasta 4 m de altura, con 2 m de crecimiento en un año.

Si bien los resultados estadísticos sugieren que la especie sólo se ve afectada en su TCPA por el factor de disponibilidad lumínica, las gráficas, reportes y observaciones de campo confirman que esta especie tiene algunos requerimientos microclimáticos más específicos, como zonas de buen drenaje, suelos arcillo limosos, ácidos y con una buena capa de materia orgánica (Cárdenas y Salinas, 2006). El patrón observado para la relación del crecimiento y la disponibilidad lumínica de esta especie no es suficientemente claro y no nos permite identificar las condiciones óptimas (Anexos 7.2a y b). Sin embargo, por observaciones de campo podemos sugerir que *Q. humboldtii* crece mejor en exposición plena o media, pues observamos que muchos de los individuos ubicados en sombra estaban en mal estado. Los anexos 7.4a y b sugieren una sensibilidad a los vientos fuertes, que aunque no es estadísticamente significativa, es informativa y sugiere una tendencia similar a la observada también en otras especies y en el modelo general. En cuanto a la disponibilidad hídrica, los resultados, además de no ser estadísticamente significativos, no muestran patrones claros interpretables en términos biológicos (Anexos 7.3a y b).

A pesar de presentar tasas de crecimiento promedio satisfactorias, la proporción de árboles aptos para el análisis fue menor al 50% de los árboles sembrados, pues 20% murieron, 13% presentaron daños mecánicos y el 17% restante presentó problemas en su crecimiento hasta el punto de registrar tasas de crecimiento proporcional negativas. El bajo número de árboles evaluados genera una menor potencia en las pruebas realizadas y una menor capacidad para detectar los efectos de los factores; sin embargo, los resultados pueden estar obediendo también a algún factor ambiental que no haya sido medido, como puede ser la presencia, o ausencia, de micorrizas específicas en el suelo, un factor importante en el crecimiento del



Foto: Felipe Villegas

**Foto 19.** Detalle de la hoja de *Quercus humboldtii*.

Roble (Mitchell et al. 1984), o el estado de los individuos en el momento de la siembra. De todas formas, los resultados del Roble son alentadores y la posibilidad de establecer esta especie en El Volador es tentadora. Recomendamos entonces el uso de *Q. humboldtii* en proyectos de restauración ecológica en ambientes similares al Cerro El Volador y en zonas de mayor altitud. Debe además seleccionarse un material vegetal en óptimas condiciones para la siembra y no ubicarlo en lugares con coberturas de dosel altas.

## 8.8. *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake



Foto 20. *Schizolobium parahyba*

El Tambor es una especie pionera, natural de bosques húmedos tropicales (Engel y Parrota 2001), que presenta las mayores tasas de crecimiento, en altura y diámetro, dentro del proyecto, con individuos de hasta 10 metros de altura; sin embargo, éstas son altamente variables y parecen obedecer a las diferentes condiciones ambientales presentes en El Cerro. La mortalidad presentada por esta especie es considerable, y de acuerdo a las observaciones de campo, ésta puede estar asociada al estado del árbol en el momento de siembra y a lugares con una alta cobertura de dosel.

En esta especie se observó un efecto de los tratamientos de fertilización, sin embargo, el patrón exhibido en la TCPD (Anexo 8.1b) no parece corresponder a un comportamiento biológico razonable. En cambio, observamos que realmente están reflejando una asociación con la disponibilidad de luz general de las diferentes zonas de las islas y los tratamientos; así, observamos que el tratamiento 5, con suelo nativo de El Volador, está ubicado sólo en las Islas 6, 8 y 9, que coincidentemente, son las que presentan una mayor cobertura vegetal y sombra. Entonces, consideramos que las bajas tasas de crecimiento reportadas en este tratamiento pueden deberse realmente a efectos de la disponibilidad lumínica. De manera similar, los tratamientos 1 y 2, que presentan tasas mayores a las de los tratamientos 3 y 4 se ubican siempre en la parte superior de las islas, donde, generalmente, está más despejado y mayor exposición al sol.

Como se mencionó anteriormente, esta especie pionera, heliófila, crece de manera óptima a plena exposición y sus tasas de crecimiento presentan una relación negativa muy precisa con los niveles de cobertura (Anexos 8.2a y b). A medida que aumenta la cobertura, las tasas de crecimiento disminuyen. Al confirmar esta tendencia con los valores de cobertura, se soporta aún más la anterior apreciación sobre los tratamientos de fertilización.

Para lograr tan altas tasas de crecimiento, es razonable pensar que *Schizolobium* tiene altos requerimientos hídricos. A pesar de que los análisis estadísticos no señalan ningún efecto significativo para este factor, las gráficas permiten observar una tendencia que lo confirma, en el cual las tasas

de crecimiento en diámetro y altura para esta especie son menores en los lugares clasificados como cimas (Anexos 8.3a y b), donde el agua disponible es menor. Sin embargo, estas tasas de crecimiento reducidas siguen siendo altas a comparación del promedio general, lo que indica que esta especie tolera aceptablemente los niveles de humedad menores.

Esta especie no presenta variaciones significativas ante los vientos, siendo sus tasas de crecimiento muy similares entre los tres niveles evaluados (Anexos 8.4a y b). *S. parahyba* tiene un tallo que se engrosa rápidamente, hojas muy grandes con folíolos pequeños que ofrecen menor resistencia y un meristemo apical grande y protegido; estas características pueden explicar el buen desempeño de esta especie en los diferentes niveles de este factor.



**Foto 21.** *Schizolobium parahyba*

En conclusión y de acuerdo con lo planteado por Leopold et al. (2001) y Yepes y Villa (2011), consideramos que el Tambor es una excelente especie para utilizar en restauración ecológica. Su rápido crecimiento le permite superar a las especies invasivas con facilidad y comenzar a formar una cobertura vegetal, pudiendo servir de “nodriza” a especies menos tolerantes a pesar de no tener una copa amplia en sus primeros años. Provee beneficios como fijadora de nitrógeno. Es recomendable sembrarla en lugares con exposición lumínica alta para aprovechar su comportamiento como pionera, no es exigente en términos de disponibilidad hídrica pero prefiere la

mayor humedad posible y puede ser usada sin problemas en condiciones de vientos fuertes.

## 8.9. *Swietenia macrophylla* King



Foto 22. *Swietenia macrophylla*

La Caoba se encuentra en estado crítico de conservación debido que es la madera más valiosa e intensamente explotada en el tópicico americano. Es una especie pionera propia del bosque húmedo y seco tropical (Cárdenas y Salinas, 2006, Gullison et al. 1996). Su baja mortalidad y altas tasas de crecimiento son excelentes resultados para el proyecto de restauración en El Volador, pues confirman la posibilidad de establecer una población de esta especie que permita conservarla y aprovecharla sosteniblemente. En campo se observan en buen estado, sin embargo, algunos individuos fueron afectados por el “gusano barrenador de las Meliáceas” (*Hypsipyla grandella* Zeller) presentando un crecimiento retrasado y daños en los fustes.

El efecto presentado por los tratamientos de fertilización sobre la TCPA de esta especie es un poco confuso (Anexos 9.1a), sugiriendo que los árboles crecen más rápidamente bajo el tratamiento 2 que contiene la mitad de la dosis de fertilizantes recomendada, a comparación de los tratamientos 1, 3 e incluso el 4 con el 100% de la dosis recomendada. El tratamiento 5, con el suelo nativo de El Volador, presenta un error típico demasiado grande para generar conclusiones debido a que sólo 5 individuos fueron evaluados bajo este tratamiento. El desempeño superior del tratamiento 2 sugiere que los efectos reportados pueden estar siendo influenciados por otros factores, bióticos o abióticos, dado que el comportamiento de estos no sigue un patrón explicable biológicamente.

Se ha reportado antes que esta especie tiene una tolerancia moderada a la sombra (Ramos y Grace, 1990). Nosotros observamos que la disponibilidad lumínica, a pesar de no tener un efecto estadísticamente significativo en ninguna de las tasas de crecimiento, se manifiesta en la TCPD (Anexo 9.2b) con un patrón similar al observado en otras especies, donde el crecimiento se reduce con una cobertura de dosel media-alta (61-80%). En campo, no registramos árboles sembrados bajo una cobertura de dosel alta por lo que no se pudieron evaluar los individuos de esta especie bajo estas condiciones.

Sin embargo, la prueba de Kruskal-Wallis realiza comparaciones entre parejas, razón por la cual la potencia de la misma no debe haber sido afectada.



**Foto 23.** Detalle de la hoja de *Swietenia macrophylla*

En cuanto a los otros factores ambientales evaluados, incidencia de vientos y disponibilidad hídrica, podemos concluir que no tienen un efecto importante sobre las tasas de crecimiento en diámetro y altura de *S. macrophylla* (Anexos 9.3a y b, 9.4a y b) no es concluyente y debe ser confirmado con posteriores experimentos en los que se controlen las condiciones abióticas.

Adicionalmente, se recomienda mantener esta especie en densidades bajas con el fin de disminuir la probabilidad de la infestación por parte del gusano barrenador de las Meliáceas.

### 8.10. *Tabebuia chrysantha* (Jacq.) G. Nicholson



Foto 24. *Tabebuia chrysantha*.

Este árbol, ornamental y con madera de alto valor comercial, presenta una mortalidad por debajo de la media de las especies evaluadas, y altas tasa de crecimiento. Si bien se evidencia un efecto estadísticamente significativo de los tratamientos sobre el crecimiento en altura de esta especie, el patrón generado en sus tasas de crecimiento no refleja una respuesta coherente a los tratamientos de fertilización (Anexos 10.1a y b). La misma situación ocurre con el crecimiento en diámetro, sugiriendo que el efecto de los tratamientos sobre el desarrollo de la especie no son lo suficientemente fuertes y que el patrón manifestado para el crecimiento en altura puede ser una respuesta a otros factores

bióticos o abióticos no evaluados.

Si bien la disponibilidad lumínica no presentó un efecto significativo sobre el crecimiento de esta especie, se evidencia una respuesta del crecimiento en diámetro a la cobertura de dosel que concuerda con el comportamiento general de las especies (Anexo 10.2b). Así, se podría considerar que ésta es una especie adaptada para desarrollarse óptimamente en condiciones de alta disponibilidad lumínica. Esta respuesta, sin embargo, no se ve replicada para el crecimiento en altura (Anexo 10.2a), donde no es posible evidenciar una explicación razonable sobre el comportamiento de la especie a los diferentes niveles de luminosidad.

Adicionalmente, la disponibilidad hídrica no presentó un efecto significativo sobre la tasa de crecimiento en altura y diámetro de esta especie y, de igual forma, no se alcanza a observar un patrón en su comportamiento para este factor (Anexo 18.3a y b). Esto sugiere que el Guayacán Amarillo logra adaptarse bien a los diferentes niveles de disponibilidad hídrica presentes en El Cerro. Sin embargo, los análisis de los efectos de la incidencia de vientos (Anexos 10.4a y b) sugieren que esta especie puede presentar una respuesta positiva al exponerse a un nivel alto de éstos, aumentando sus tasas de crecimiento en diámetro y en altura.



Foto 6. Detalle de la hoja de *Tabebuia chrysantha*

La respuesta de esta especie a las diferentes condiciones ambientales sugiere un buen desarrollo en las diferentes condiciones de disponibilidad hídrica. Así mismo, se reconoce una preferencia por lugares con alta disponibilidad lumínica y un buen desarrollo en lugares expuestos a vientos fuertes. Consideramos que estas características, junto con su baja tasa de

mortalidad y valor paisajístico, hacen pertinente el uso de esta especie para proyectos de restauración en áreas urbanas similares, en donde se vean involucrados fuertes vientos y diferentes niveles de disponibilidad hídrica.

## 11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Si bien hay un efecto de los tratamientos de fertilización sobre el crecimiento en diámetro y para el modelo general, éste no sugiere un efecto de los fertilizantes ni de las micorrizas sobre el crecimiento de las plantas, siendo el suelo preparado el factor que estaría determinando tal diferenciación. Sin embargo, este patrón no se repite en todas las especies que señalan tener un efecto, siendo inclusive en algunos casos, contrarios al propuesto por el modelo general. En el crecimiento en altura el patrón no es consistente con el anterior y sugiere que las diferencias observadas no son atribuibles a la fertilización, recibiendo interferencia causada por otros factores.

El factor de disponibilidad lumínica tiene efectos importantes en 5 de las especies evaluadas y en el modelo general. Se evidencian diferentes tipos de respuestas de acuerdo a su grupo funcional y a las características propias de la especie con diferentes niveles del factor para un óptimo crecimiento.

La disponibilidad hídrica juega un papel importante en el crecimiento de 5 de las especies evaluadas, en las que, generalmente, se observa un mejor rendimiento en niveles de alta disponibilidad. Sin embargo, algunas especies se muestran tolerantes a diferentes niveles de este factor, característica favorable para la restauración ecológica.

Igualmente, el crecimiento de los árboles de 5 de las especies evaluadas se ve influenciado por la incidencia de vientos, donde cada una tiene respuestas diferentes. Generalmente, una mayor incidencia de vientos tiene un efecto negativo en las tasas de crecimiento en altura, pero parecen desencadenar una respuesta de crecimiento en diámetro.

Por las razones anteriormente mencionadas, y el alto costo que representa la aplicación de fertilizantes, micorrizas y tierra preparada, sugerimos que no es necesaria su utilización para la ejecución de proyectos de restauración similares. Más bien, considerando que los factores ambientales evaluados pueden tener diferentes efectos sobre las especies, es importante seleccionar la ubicación de las plantas teniéndolos en cuenta, ubicándolas en los niveles de crecimiento óptimo de la especie, con el fin de promover el crecimiento de los árboles y desarrollar proyectos de restauración ecológica más exitosos. A continuación listamos recomendaciones a tener en cuenta para cada una de las especies evaluadas:

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE TRES FACTORES ABIÓTICOS SOBRE EL CRECIMIENTO DE  
10 ESPECIES DE ÁRBOLES SEMBRADOS EN EL PROYECTO DE RESTAURACIÓN  
ECOLÓGICA DEL CERRO EL VOLADOR EN MEDELLÍN, ANTIOQUIA.

ESPECIE	RECOMENDACIONES DE SIEMBRA:
<i>Ardisia elliptica</i>	No recomendada. Especie exótica, potencialmente invasora.
<i>Caesalpinia ebano</i>	Niveles altos y medios de exposición lumínica. Poca tolerancia a vientos. Tolerante a diferentes niveles de disponibilidad hídrica.
<i>Cariniana pyriformis</i>	Niveles medios de luminosidad. Poca tolerancia a vientos. Lugares de alta disponibilidad hídrica. Estado de conservación: Peligro Crítico.
<i>Dipteryx oleifera</i>	Tolerante a diferentes niveles de luminosidad. Tolerante a vientos. Proteger de los pastos. Potencial económico.
<i>Luehea seemannii</i>	Niveles medios de luminosidad. Poca tolerancia a vientos. Requiere buena disponibilidad hídrica.
<i>Pithecellobium sp.</i>	Tolerante a diferentes niveles de luminosidad. Tolerante a vientos. Tolerante a diferentes niveles de disponibilidad hídrica.
<i>Quercus humboldtii</i>	Niveles altos y medios de luminosidad. Baja tolerancia a vientos fuertes. Especie sensible, de tierras más altas.
<i>Schizolobium parahyba</i>	Niveles altos de luminosidad. Tolerante a vientos. Tolerante a diferentes niveles de disponibilidad hídrica. Tasas de crecimiento altas. Tolerante a especies invasivas.
<i>Swietenia macrophylla</i>	Niveles altos y medios de luminosidad. Tolerante a vientos. Tolerante a diferentes niveles de disponibilidad hídrica. No sembrar en alta densidad. Estado de conservación: Peligro Crítico.
<i>Tabebuia chrysantha</i>	Niveles altos de luminosidad. Tolerante a vientos. Tolerante a diferentes niveles de disponibilidad hídrica. Tolerante a poca disponibilidad hídrica, alta incidencia de vientos. Predilección por lugares con alta luminosidad

**Tabla 18.** Recomendaciones de siembra para 10 especies de árboles utilizadas en la restauración ecológica del Cerro el Volador

## 12. AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer a la Secretaría de Medio Ambiente de Medellín y el Herbario de la Universidad de Antioquia, con nuestros asesores Felipe Cardona y Cristina López a la cabeza, por permitirnos hacer parte de este proyecto e igualmente a Rubiela Jiménez y al personal del Jardín Botánico de Medellín por su apoyo.

Adicionalmente, reconocemos que a lo largo de esta carrera hubo un sinnúmero de personas (profesores, compañeros y demás) que nos inspiraron y ayudaron en diferentes facetas, ya sea como biólogos o como personas, o simplemente sacando una que otra sonrisa con su presencia.

Indudablemente el apoyo de nuestra familia hizo posible que se cumpliera esta meta, tan solo un paso en un camino de felicidad.

Pretendemos así, agradecerles a ustedes –todos– aprovechando las herramientas que nos han brindado para hacer de nuestras vidas algo más hermoso de lo que ya es y esperamos, de alguna forma, lograr que las de ustedes también lo sean.

*“La mejor forma de agradecer una oportunidad es aprovechándola”*

Tomás H.

### 13. REFERENCIAS

- Andrés, P. (2010). Degradación y restauración de los ecosistemas terrestres latinoamericanos. *Ambienta: la revista del Ministerio de Medio Ambiente*, (92), 58–70.
- Ballaré, C. (1999). Keeping up with the neighbours: phytochrome sensing and other signalling mechanisms. *Trends in plant science*, 4(5), 201.
- Bartens, J., Wiseman, P. E., y Smiley, E. T. (2010). Stability of landscape trees in engineered and conventional urban soil mixes. *Urban Forestry y Urban Greening*, 9(4), 333-338. Elsevier GmbH. doi:10.1016/j.ufug.2010.06.005
- Bezona, N., Hensley, D., Yogi, J., Tavares, J., Rauch, F., Iwata, R., Kellison, M., et al. (2009). Salt and Wind Tolerance of Landscape Plants for Hawai'i. *Tropical Agriculture* (Vol. 13). University of Hawaii.
- Botero, L., y De la Ossa, J. (2010). Estudio de caso: un sistema de producción con enfoque agroecológico, departamento del Magdalena, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 2(1), 225–241.
- Bradshaw, A. (1983). The reconstruction of ecosystems. Presidential address to the British Ecological Society, December 1982. *Journal of Applied Ecology*, 20, 1-17.
- Cairns, J., y Heckman, J. R. (1996). RESTORATION ECOLOGY: The State of an Emerging Field. *Annual Review of Energy and the Environment*, 21(1), 167-189. doi:10.1146/annurev.energy.21.1.167
- Cárdenas, D., Salinas, N (2006a). Quercus humboldtii Bonpl -Roble-. En D. Cárdenas y N. Salinas (Eds.), *Libro rojo de plantas de colombia especies maderables amenazadas* (pp. 156-160). Bogotá DC: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI.
- Cárdenas, D., Salinas, N (2006b). Swietenia macrophylla King -Caoba-. En D. Cárdenas y N. Salinas (Eds.), *Libro rojo de plantas de colombia especies maderables amenazadas* (pp. 161-165). Bogotá DC: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI.
- Clark, D. A., y Clark, DB. (1992). Life history diversity of canopy and emergent trees in a neotropical rain forest. *Ecological monographs*, 62(3), 315–344. Eco Soc America.
- Clark, D. B., y Clark, D. A. (1991). The impact of physical damage on canopy tree regeneration in tropical rain forest. *The Journal of Ecology*, 79(2), 447–457. JSTOR. doi:10.2307/2260725
- Clark, DA, y Clark, DB. (1999). Assessing the growth of tropical rain forest trees: issues for forest modeling and management. *Ecological Applications*, 9(3), 981-997.
- Clark, DA, y Clark, DB. (2001). Getting to the Canopy : Tree Height Growth in a Neotropical Rain Forest. *Ecology*, 82(5), 1460-1472.
- Condit, R., Hubbell, S., y Foster, R. (1995). Mortality Rates of 205 Neotropical Tree and Shrub Species and the Impact of a Severe Drought. *Ecological Monographs*, 65(4), 419-439.

- Corporación Académica Ambiental (CAA), Universidad De Antioquia (UdeA)., Secretaría De Medio Ambiente De Medellin (SMA) y Área Metropolitana Del Valle De Aburrá (AMVA). (2006). *Cerro El Volador. Resumen Ejecutivo*. Proyecto planes de manejo y gestión integral Cerros Tutelares de Medellín. Medellín.
- Dalling, J., y Hubbell, S. (2002). Seed size, growth rate and gap microsite conditions as determinants of recruitment success for pioneer species. *Journal of Ecology*, 90(3), 557–568. Wiley Online Library.
- Daws, M. I., Mullins, C. E., Burslem, D. F. R. P., Paton, S. R., y Dalling, J. W. (2002). Topographic position affects the water regime in a semideciduous tropical forest in Panama. *Plant and Soil*, 238(1), 79–89. Springer.
- Devkota, A., y Jha, P. (2010). Effects of Different Light Levels on the Growth Traits and Yield of *Centella asiatica*. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 5(4), 226-230.
- Dobson, a P. (1997). Hopes for the Future: Restoration Ecology and Conservation Biology. *Science*, 277(5325), 515-522. doi:10.1126/science.277.5325.515
- Donald, P. F. (2004). Biodiversity Impacts of Some Agricultural Commodity Production Systems. *Conservation Biology*, 18(1), 17-38. doi:10.1111/j.1523-1739.2004.01803.x
- Engel, V., y Parrotta, J. (2001). An evaluation of direct seeding for reforestation of degraded lands in central São Paulo state, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 152(1-3), 169–181. Elsevier.
- Galeano, G., Calderon, E., Dueñas, H., y Tobón, I. (2006). *Cariniana pyriformis* Miers - Abarco-. En: D. Cárdenas y Nelson Salinas (Eds.), *Libro rojo de plantas de colombia especies maderables amenazadas* (pp. 46-49). Bogotá DC: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI.
- Grupo de Restauración Ecológica de la Universidad Nacional de Colombia (GREUNAL). (2009). *Libro de Resúmenes I Congreso de Restauración Ecológica y II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica*.
- Gullison, R. E., Panfil, S. N., Strouse, J. J., y Hubbell, S. P. (1996). Ecology and management of mahogany (*Swietenia macrophylla* King) in the Chimanes Forest, Beni, Bolivia. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 122(1), 9-34. doi:10.1111/j.1095-8339.1996.tb02060.x
- Häger, A. (2010). The effect of climate and soil conditions on tree species turnover in a Tropical Montane Cloud Forest in Costa Rica. *Revista de biología tropical*, 58(4), 1489-506.
- Hilderbrand, R. H., Watts, A. C., y Randle, A. M. (2005). The myths of restoration ecology. *Ecology and Society*, 10(1), 19.
- Hinestroza, T. Villegas, F. (2010). *Informe Final. Primer Monitoreo de Crecimiento y Sobrevivencia de los Árboles Sembrados Bajo el Proyecto "Implementación de un Modelo de Restauración Ecológica y Forestal en El Cerro Volador"*. Secretaría de Medio Ambiente de Medellín. Medellín.
- Hinestroza, T. Villegas, F. (2011). *Informe Final. Segundo Monitoreo de Crecimiento y Sobrevivencia de los Árboles Sembrados Bajo el Proyecto "Implementación de un*

*Modelo de Restauración Ecológica y Forestal en El Cerro Volador*". Secretaría de Medio Ambiente de Medellín. Medellín.

- Instituto Alexander Von Humboldt (IAVH). (1998). *El Bosque seco Tropical en Colombia* (pp. 1-24).
- Kattan, G. y Alvarez, H. (1996). Preservation and management of biodiversity in fragmented landscape in the colombian Andes. p. 3 - 18. En: *J. Schelhas y Greenberg (Eds.) Forest patches in tropical landscapes*, Island Press, 426 pp.
- Kiehl, K., Kirmer, A., Donath, T. W., Rasran, L., y Hölzel, N. (2010). Species introduction in restoration projects – Evaluation of different techniques for the establishment of semi-natural grasslands in Central and Northwestern Europe. *Basic and Applied Ecology*, 11(4), 285-299. doi:10.1016/j.baae.2009.12.004
- King, D. (1986). Tree form, height growth, and susceptibility to wind damage in *Acer saccharum*. *Ecology*, 67(4), 980-990.
- Lang, G., y Knight, D. (1983). Tree Growth , Mortality , Recruitment , and Canopy Gap Formation during a 10-year Period in a Tropical Moist Forest. *Ecology*, 64(5), 1075-1080.
- Laurance, W. F., y Useche, D. C. (2009). Environmental synergisms and extinctions of tropical species. *Conservation biology: the journal of the Society for Conservation Biology*, 23(6), 1427-37. doi:10.1111/j.1523-1739.2009.01336.x
- Leopold, A., Andrus, R., Finkeldey, A., y Knowles, D. (2001). Attempting restoration of wet tropical forests in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 142(1-3), 243–249. Elsevier.
- Lopez, R., y Montero, I. (2006). *Dipteryx oleifera* Benth -Choibá-. En: D. Cárdenas y Nelson Salinas (Eds.), *Libro rojo de plantas de colombia especies maderables amenazadas* (pp. 75-78). Bogotá DC: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI.
- McKinney, M. L. (2002). Urbanization, Biodiversity, and Conservation. *BioScience*, 52(10), 883–890. BioOne.
- Mitchell, R., Cox, G., Dixon, R., Garrett, H., y Sander, I. (1984). Inoculation of three *Quercus* species with eleven isolates of ectomycorrhizal fungi. II. Foliar nutrient content and isolate effectiveness. *Forest science*, 30(3), 563–572. Society of American Foresters.
- Márquez Calle, G. (2003). Ecosistemas estratégicos de Colombia. *sogeocol*.
- Organización Mundial de Meteorología (OMM). (1991). Desastres naturales, un problema en aumento. *Protección Civil*, 10(Marzo-Abril), 11-14.
- Pascarella, J. (1998). Resiliency and response to hurricane disturbance in a tropical shrub, *Ardisia escallonioides* (Myrsinaceae), in south Florida. *American journal of botany*, 85(9), 1207-1215.
- Pascarella, J.B., y Horvitz, C. C. (1998). Seed and seedling ecology of the invasive non-indigenous shrub *Ardisia elliptica* Thunb. (Myrsinaceae) in south Florida. (P. J. Cannizzaro, Ed.) *Proceedings of the Twenty Fifth Annual Conference on*

*Ecosystems Restoration and Creation* : May 1998, 25, 76-88. Hillsborough  
Community College.

- Pascarella, John B. (1997). Breeding Systems of *Ardisia* Sw. (Myrsinaceae). *Brittonia*, 49(1), 45. doi:10.2307/2807693
- Pauchard, a, Aguayo, M., Pena, E., y Urrutia, R. (2006). Multiple effects of urbanization on the biodiversity of developing countries: The case of a fast-growing metropolitan area (Concepción, Chile). *Biological Conservation*, 127(3), 272-281. doi:10.1016/j.biocon.2005.05.015
- Poorter, L. (1999). Growth responses of 15 rain-forest tree species to a light gradient: the relative importance of morphological and physiological traits. *Functional Ecology*, 13(3), 396-410. doi:10.1046/j.1365-2435.1999.00332.x
- Ramos, J., y Grace, J. (1990). The effects of shade on the gas exchange of seedlings of four tropical trees from Mexico. *Functional Ecology*, 4(5), 667-677.
- Riederer, M., y Schreiber, L. (2001). Protecting against water loss: analysis of the barrier properties of plant cuticles. *Journal of experimental botany*, 52(363), 2023-32.
- Ruiz, J., Boucher, D. H., Chaves, L. F., Ingram-Flóres, C., Guillén, D., Tórrez, R., y Martínez, O. (2010). Ecological consequences of primary and secondary seed dispersal on seed and seedling fate of *Dipteryx oleifera* (Fabaceae). *Revista de biología tropical*, 58(3), 991-1007.
- Ruiz-Jaen, M. C., y Aide, T. M. (2006). An integrated approach for measuring urban forest restoration success. *Urban Forestry y Urban Greening*, 4(2), 55-68. doi:10.1016/j.ufug.2005.09.002
- Russo, S. E., Davies, S. J., King, D. a, y Tan, S. (2005). Soil-related performance variation and distributions of tree species in a Bornean rain forest. *Journal of Ecology*, 93(5), 879-889. doi:10.1111/j.1365-2745.2005.01030.x
- Secretaría de Medio Ambiente de Medellín (SMA), Área Metropolitana Del Valle De Aburrá (AMVA), Corporación Académica Ambiental (CAA), Universidad De Antioquia (UdeA)., y. (2006). Planes de Manejo y Gestión Integral de los Cerros Tutelares de Medellín -Documento Metodológico del Diagnóstico-. Medellín.
- Secretaría de Medio Ambiente de Medellín (SMA), Universidad de Antioquia (UDEA). (2009) *Implementación de un modelo de restauración ecológica y forestal en el Cerro El Volador*. Informe Final. Medellín.
- Shearman, P. L., Ash, J., Mackey, B., Bryan, J. E., y Lokes, B. (2009). Forest Conversion and Degradation in Papua New Guinea 1972-2002. *Biotropica*, 41(3), 379-390. doi:10.1111/j.1744-7429.2009.00495.x
- Smith, RL y Smith, TL. (2001). *Ecología*. 4a Ed. Madrid. Pearson Educación S.A. pp 664.
- Smith, V., y Ennos, A. (2003). The effects of air flow and stem flexure on the mechanical and hydraulic properties of the stems of sunflowers *Helianthus annuus* L. *Journal of experimental botany*, 54(383), 845-849. doi:10.1093/jxb/erg068

- Society for Ecological Restoration International Science y Policy Working Group. (2004). *The SER International Primer on Ecological Restoration. Ecological Restoration* (Vol. 2, pp. 206-207).
- Sodhi, N. S., y Ehrlich, P. R. (Eds.). (2009). *Conservation biology for all*. New York: Oxford University Press.
- Tassara, C., Jiménez, D., Grando, L., y Zuluaga, Y. (1999). *El desplazamiento por la violencia en Colombia -Experiencias, análisis y posibles estrategias de atención en el Departamento de Antioquia-*. (ECO Ediciones, Ed.) *Memorias del Foro Internacional "Desplazados internos en Antioquia"* (pp. 1-123). Medellín.
- Tropicos.org. (2009). Tropicos.org Catalogue of the Vascular Plants of the Department of Antioquia (Colombia) *Cariniana pyriformis*. En: Revisado Octubre 26, 2011, from <http://tropicos.org/Name/17900284?projectid=11>
- Tropicos.org. (2009). Tropicos.org Catalogue of the Vascular Plants of the Department of Antioquia (Colombia) *Caesalpinia ebano*. Revisado 26, 2011, from <http://tropicos.org/Name/13003208?projectid=11>
- Valladares F (1999) Architecture, ecology and evolution of plant crowns. En: Pugnaire FI, Valladares F (eds) Handbook of functional plant ecology. Dekker, New York, pp 121±194
- Wadsworth, R. (1959). An optimum wind speed for plant growth. *Annals of Botany*, 23(89), 195-199. Annals Botany Co.
- Wright, S. J., y Muller-Landau, H. C. (2006). The Future of Tropical Forest Species. *Biotropica*, 38(3), 287–301. Blackwell Publishing.
- Yancey, P. H., Clark, M. E., Hand, S. C., Bowlus, R. D., y Somero, G. N. (1982). Living with water stress: evolution of osmolyte systems. *Science*, 217(4566), 1214-1222. American Association for the Advancement of Science.
- Yepes, A. P., y Villa, J. A. (2011). Sucesión vegetal luego de un proceso de restauración ecológica en un fragmento de bosque seco tropical (La Pintada, Antioquia). *Revista Lasallista de Investigación*, 7(2), 1-14.
- Zhong, J., Zhou, B., Long, W., y Zeng, J. (2011). Effects of Shading on Photochemical Efficiency in Ornamental Plants *Ardisia mamillata* Hance and *Ardisia japonica* (Thunberg). *Northern Horticulture*, 09.
- Zheng, Z., y Min, C. (1998). Photosynthetic response to light in understory for six species young trees of a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna. *Acta Phytocologica Sinica*, 22(6), 499–504.
- Zimmerman, J. K., Everham, E. M., Waide, R. B., Lodge, D. J., Taylor, C. M., y Brokaw, N. V. L. (1994). Responses of tree species to hurricane winds in subtropical wet forest in Puerto Rico: implications for tropical tree life histories. *Journal of Ecology*, 82(4), 911-922.