



Estrategias de restauración para el páramo de frailejones perturbado por incendios en el norte de Ecuador

J. Rodríguez-Echeverry^{1,*}, M. Leiton¹

(1) Departamento de Ecología de Paisaje, Restauración y Conservación de la Biodiversidad, Fundación Takiyaco, Colombia

* Autor de correspondencia: J. Rodríguez-Echeverry [wairajames@yahoo.com]

> Recibido el 16 de junio de 2020 - Aceptado el 27 de septiembre de 2020

Rodríguez-Echeverry, J., Leiton, M. 2020. Estrategias de restauración para el páramo de frailejones perturbado por incendios en el norte de Ecuador. *Ecosistemas* 29(3):2018. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2018>

En orden a proponer estrategias para la restauración del páramo de frailejones perturbado por incendios en el norte de Ecuador, este estudio evaluó la efectividad de tres técnicas que utilizaron tres especies nativas en tres sitios con diferente pendiente del terreno: alta (>30%), media (entre 15% y 30%) y baja (<15%). En cada sitio se establecieron seis ensayos de restauración en los que se implementaron las técnicas: introducción de especie nativa, con plantación de *Polylepis incana* en dos densidades diferentes; reubicación de plantas y regeneración natural, cada una con las especies *Hypericum laricifolium* e *Hypericum lancioides*. Las plantas fueron monitoreadas durante 24 meses. Se evaluó la efectividad de las técnicas en términos del éxito en supervivencia, crecimiento y estado fitosanitario de las plantas, mediante el estimador de Kaplan-Meier, análisis de varianza utilizando el test de comparación de medias Tukey ($p < 0.05$) y prueba de Chi cuadrado, respectivamente. Las estrategias fueron propuestas con base en la efectividad de las técnicas en cada sitio. La estrategia para sitios con pendiente alta debe estar conformada por introducción de especie nativa de *P. incana* en menor densidad y regeneración natural con *H. lancioides*; para sitios con pendiente media con introducción de especie nativa de *P. incana* en ambas densidades, y regeneración natural con *H. laricifolium*; para sitios con pendiente baja con introducción de especie nativa de *P. incana* en mayor densidad y reubicación de plantas con *H. laricifolium* y *H. lancioides*. Las estrategias propuestas contribuyen en el diseño y planificación de la restauración de este importante ecosistema altoandino.

Palabras clave: degradación; dinámicas de recuperación; ecosistema páramo; quemas

Rodríguez-Echeverry, J., Leiton, M. 2020. Restoration strategies for the páramo of frailejones effected by fires in northern Ecuador. *Ecosistemas* 29(3):2018. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2018>

In order to propose strategies for the restoration of the páramo of frailejones perturbed by fires in northern Ecuador, this study evaluated the effectiveness of three techniques that used three native species in three sites with different slope in the terrain. Three sites with different slopes were identified: Upper (>30%), Middle (between 15% and 30%) and Low (<15%). In each site, six restoration trials were established. In these trials, the following three techniques were implemented: introduction of native species, with the planting of *Polylepis incana* in two different densities; plant relocation and natural regeneration, each technique with the species *Hypericum laricifolium* and *Hypericum lancioides*. Plants were monitored for 24 months. The effectiveness of the techniques was evaluated in terms of the success in survival, growth and phytosanitary status of the plants, using the Kaplan-Meier estimator, analysis of variance with the Tukey mean comparison test ($p < 0.05$), and Chi square test, respectively. Restoration strategies were proposed based on the effectiveness of the following techniques in each site: Introduction of native species of *P. incana* in lower density and natural regeneration of *H. lancioides* in the Upper slope sites; introduction of native species of *P. incana* in both densities and natural regeneration of *H. laricifolium* in the Middle slope sites; introduction of native species of *P. incana* in higher density and plant relocation of *H. laricifolium* and *H. lancioides* in the Low slope sites. The proposed strategies contribute to the design and planning of the restoration of this important high Andean ecosystem.

Key words: degradation; fires; páramo ecosystem; recovery dynamics

Introducción

El incendio prescrito o controlado es una perturbación vital para los ecosistemas y a menudo es un componente importante de los planes de restauración ecológica (Ruffner y Groninger 2006; Sánchez-Meador et al. 2017). Este ayuda a mantener la biodiversidad y los procesos ecológicos (Duncan et al. 2008; Ellsworth et al. 2015), debido a que reduce la cantidad de material vegetal combustible, lo que minimiza la incidencia de incendios, previene la invasión de especies, entre otros (Moya et al. 2011; Franklin y Johnson 2012). Sin embargo, un incendio no prescrito se propaga sin control a través de grandes extensiones de territorio afectando

a diferentes ecosistemas (Ellsworth et al. 2015). Este tipo de incendio genera pérdida de hábitat, reducción de la biodiversidad, aceleración temporal del proceso de erosión del suelo, inestabilidad del equilibrio de los nutrientes del suelo, la degradación estética, entre otros (Kaloudis et al. 2005; Jordan et al. 2010; Vonshak et al. 2010; Kquofi 2011; de Oliveira et al. 2014).

El páramo constituye uno de los ecosistemas más importantes en el mundo, ya que cumple funciones naturales, culturales y económicas, al proveer múltiples servicios ecosistémicos relacionados con su capacidad de interceptar, almacenar y regular los flujos hídricos superficiales y subterráneos (Vargas et al. 2010; Liambí et al. 2012). Además, este ecosistema registra altos niveles de bio-

diversidad y endemismos, y es importante para la identidad andina en millones de personas (Fiallos et al. 2015; Correa et al. 2016). El páramo se encuentra generalmente entre 2800 y 4700 m s.n.m., está compuesto de pastizales y matorrales, y contiene lagos y humedales distribuidos de manera discontinua en la cordillera de los Andes desde el norte de Perú hasta Costa Rica (Giles et al. 2017). Casi todos los principales sistemas fluviales en Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela se originan en los páramos, lo que los convierte en el mayor proveedor de agua potable, riego e hidroelectricidad para los países del norte andino (Correa et al. 2016; Giles et al. 2017).

A pesar de la importancia ecológica del páramo, la necesidad de incrementar el uso de suelo agrícola y ganadero ha generado un incremento en la incidencia de incendios no prescritos o quemadas indiscriminadas, las cuales son amenazas muy preocupantes, no solo por su extensión y frecuencia, sino también por sus impactos severos sobre la integridad ecológica de este ecosistema (Suárez 2009; Céleri 2010; Hofstade 2014; Armenteras et al. 2020). Se ha registrado que los niveles intermedios de perturbación favorecen el incremento de especies en la vegetación en pie mientras que los niveles máximos de perturbación la disminuyen. En contraste, la densidad y riqueza del banco de semillas disminuye con la perturbación intermedia y aumenta con la perturbación fuerte. También se ha reportado que la fitomasa epigea, la necromasa y fitomasa de raíces disminuye (Suárez y Medina 2001; de los Ángeles 2013; Ramsay 2014). Los niveles máximos de perturbación impactan severamente a especies clave del páramo. En *Chusquea tessellata* disminuye cuatro veces la regeneración de su fitomasa. Mientras que en *Espeletia* sp. genera la formación de bancos de semillas transitorios, dificultad en el reclutamiento, mayor variación en las tasas de crecimiento y una limitada capacidad de regeneración natural (Verweij y Kok 1992; de los Ángeles 2013; Ramsay 2014; Zomer 2016). En este contexto, este tipo de perturbación transforma las comunidades vegetales iniciales en otras muy distintas, lo que afecta a todos los niveles de las comunidades biológicas del páramo (Cárdenas y Vargas 2008; Olivera y Cleef 2009; Valencia et al. 2013). En consecuencia, los incendios no prescritos modifican la composición, estructura y función de este ecosistema, lo que impacta la biodiversidad y en particular la provisión de servicios ecosistémicos clave, tales como: la provisión y regulación hídrica (Buytaert et al. 2002; Suárez 2009; Minaya 2017; Bremer et al. 2019). Estos impactos se manifiestan en un descenso en la calidad de vida tanto de las personas que viven directamente del páramo, en su mayoría comunidades indígenas y campesinas, como de las que viven indirectamente y que suma millones de personas que usan y necesitan el agua generada en este ecosistema (Mena y Hofstade 2006; Hofstade 2014; Correa et al. 2016; van Colen et al. 2017). Por lo tanto, es necesario realizar acciones que ayuden a revertir la perturbación del páramo, lo que, a su vez, contribuiría en mantener la calidad de vida de un gran número de personas.

En Ecuador se han identificado 11 tipos de páramo de acuerdo a su composición florística (MAE 2013), de los cuales el páramo de frailejones, caracterizado por la especie *Espeletia pycnophylla*, ha registrado una progresiva degradación por incendios en las últimas décadas debido al uso del fuego para la habilitación de suelo destinado al desarrollo de actividades antrópicas como la agricultura y ganadería (Sarmiento 1997; INEC 2013; MAE 2013; SENPLADES 2017). En este contexto, en el mes de septiembre del año 2015 ocurrió el mayor incendio no prescrito registrado en el páramo de frailejones localizado en la parroquia de Chitán de Navarrete, cantón Montufar, provincia del Carchi, norte de Ecuador. Este incendio afectó 3000 ha aproximadamente, lo que impactó severamente la integridad ecológica del ecosistema. Lo anterior ha sido tema de discusión entre entidades ambientales gubernamentales y la comunidad en general, quienes han destacado la urgente necesidad de implementar acciones de restauración ecológica para recuperar el ecosistema (MAE 2015).

La restauración ecológica proporciona herramientas conceptuales y técnicas a partir de las cuales se pueden establecer estrategias de restauración para alcanzar el éxito de esta práctica (Aronson et al. 2010; Zhang et al. 2014). Sin embargo, cada ecosistema a restaurar tiene una historia de perturbación y recuperación muy particular de acuerdo al tipo, intensidad y frecuencia de la perturbación. Por lo tanto, no existen estrategias universales exitosas. Solo existen técnicas, que pueden ser utilizadas de manera complementaria en el tiempo y en el espacio, que deben ser evaluadas con el fin de identificar cuáles pueden conformar las estrategias más efectivas para la recuperación de un determinado ecosistema de acuerdo a la particularidad de la perturbación que lo afectó (SER 2004; López-Barrera 2015). Actualmente, en Ecuador no existen estudios sobre restauración ecológica del ecosistema páramo perturbado por incendios, solo se han realizado estudios sobre: el análisis de los avances, desafíos y perspectivas de la restauración del páramo; la ecología de dispersión de semillas y la invasión de pastos debido a afectaciones por incendios; el grado de degradación del páramo y la influencia del suelo en la restauración; y la elaboración de una guía técnica para la restauración ecológica del páramo herbazal del Antisana (Sarmiento 1995, 1997, 2002; Aguirre et al. 2013; Jumbo et al. 2016; Torres-Celi et al. 2016; Murcia et al. 2017). Por lo tanto, no existen estudios que proporcionen estrategias de restauración a partir de la evaluación de la efectividad de las técnicas en la recuperación del páramo de frailejones perturbado por incendios. Debido a ello, no se cuenta con información clave para la restauración de este ecosistema.

Además, se deben realizar estudios que consideren la pendiente del terreno en función del relieve como factor clave en el establecimiento de la vegetación y por ende en la integridad ecológica del páramo (Llambí et al. 2012; Aguirre et al. 2013; UICN 2016), ya que mientras menor es la pendiente en el páramo, mayor es la profundidad del suelo, la capacidad de almacenamiento hídrico y el contenido de humedad, por consiguiente donde la pendiente es pronunciada, el suelo no logra alcanzar espesores significativos, está menos desarrollado y posee baja capacidad de almacenamiento. Además, en sitios con pendientes pronunciadas, el viento actúa con mayor intensidad y el agua tiene menos oportunidades para infiltrarse al interior del suelo, lo que favorece el arrastre de materiales hacia las partes bajas (Llambí et al. 2012). Por lo tanto, la realización de este tipo de estudios proporcionaría conocimiento clave sobre cuáles especies deben ser consideradas para la restauración del páramo de frailejones en diferentes inclinaciones del terreno.

En orden a proponer estrategias para la restauración del páramo de frailejones perturbado por incendios en el norte de Ecuador, este estudio evaluó la efectividad de las técnicas introducción de especie nativa, reubicación de plantas y regeneración natural implementadas con las especies nativas *Polylepis incana* Kunth, *Hypericum laricifolium* Juss e *Hypericum lancoides* Cuatrecasas en tres sitios con diferente pendiente del terreno. Específicamente, se evaluó la efectividad de las técnicas en términos de supervivencia, crecimiento y estado fitosanitario de las plantas en cada sitio con diferente inclinación del terreno. Las técnicas fueron seleccionadas debido a su importancia en el manejo de la sucesión secundaria o regeneración natural asistida (SER 2004; UICN 2016), y las especies fueron seleccionadas debido a su presencia en el ecosistema no perturbado y disponibilidad. Este estudio planteó la siguiente hipótesis de investigación: Es posible esperar que las técnicas introducción de especie nativa, reubicación de plantas y regeneración natural implementadas con las especies *P. incana*, *H. laricifolium* y *H. lancoides* no tienen la misma efectividad de restauración en cada uno de los tres sitios con diferente inclinación del terreno, por lo tanto, las estrategias de restauración son diferentes según la pendiente. Este estudio es un primer paso para conocer las técnicas y especies que deben conformar las estrategias para la recuperación del páramo de frailejones. En consecuencia, la información generada contribuye en la planificación de la restauración de este ecosistema perturbado por incendios.

Materiales y Métodos

Área de estudio e identificación de sitios para establecer los ensayos de restauración

El área de estudio se localiza en el ecosistema páramo de frailejones de la parroquia de Chitán de Navarrete, cantón Montufar, provincia del Carchi, norte de Ecuador ($0^{\circ} 42' 03''\text{N}$ y $77^{\circ} 49' 02''\text{O}$) (Fig. 1). Esta tiene una elevación de 3400 m s.m.m., una temperatura media de 5°C , una humedad relativa del 85% y una precipitación anual de 3000 mm (INAMHI 2005). La vegetación del páramo de frailejones no perturbado o ecosistema de referencia está compuesta principalmente por *Espeletia pycnophylla* Cuatrec (frailejón). También se registra la presencia de *P. incana*; *H. laricifolium*; *H. lancioides*; *Oreopanax sodiroi*; *Eriocaulon microcephalum*; *Azorella* sp.; *Calamagrostis* spp.; *Agrostis* sp., entre otras (GAD 2015). Entre la fauna se registra la presencia de *Tremarctos ornatus*, *Puma concolor*, *Odocoileus virginianus*, *Lycalopex culpaeus*, *Sylvilagus brasiliensis*, entre otras (MAE 2013).

La identificación de los sitios para establecer los ensayos de restauración se realizó mediante los siguientes criterios: i) Pendiente del terreno, la cual está relacionada con la posición topográfica. La pendiente influye en la adaptación y el crecimiento de las

especies vegetales (Llambí et al. 2012). La determinación de los sitios con diferente inclinación del terreno se realizó según las categorías de pendiente propuestas por la UICN (2016). ii) Ecológico, el cual permite identificar hábitats prioritarios para la conservación (Ramsar 2005). iii) Accesibilidad al área de estudio, la cual es fundamental para el desarrollo exitoso del proyecto (Vargas et al. 2010). De acuerdo a lo anterior, se identificaron tres sitios con diferentes pendientes del terreno. Estos estuvieron ubicados a una distancia aproximada de 250 m entre ellos. El sitio 1 (S1) estuvo ubicado en la parte alta o escarpada del páramo de frailejones en una pendiente $>30\%$, el sitio 2 (S2) en la parte media o moderadamente escarpada en una pendiente entre 15% y 30%, y el sitio 3 (S3) en la parte baja o suavemente inclinada y casi plana en una pendiente $<15\%$ (UICN 2016) (Fig. 2). Adyacente al S3 se encuentra un humedal de 0.5 ha, el cual es un hábitat prioritario de conservación (Ramsar 2005). El área identificada está ubicada a una distancia de 1.5 km de un camino terciario o vecinal.

Diseño e implementación de técnicas de restauración

En cada uno de los tres sitios con diferente pendiente del terreno se implementaron tres técnicas de restauración, cada técnica se implementó en dos parcelas de estudio de 20 x 20 m, las cuales estuvieron conformadas por 20 plantas cada una.

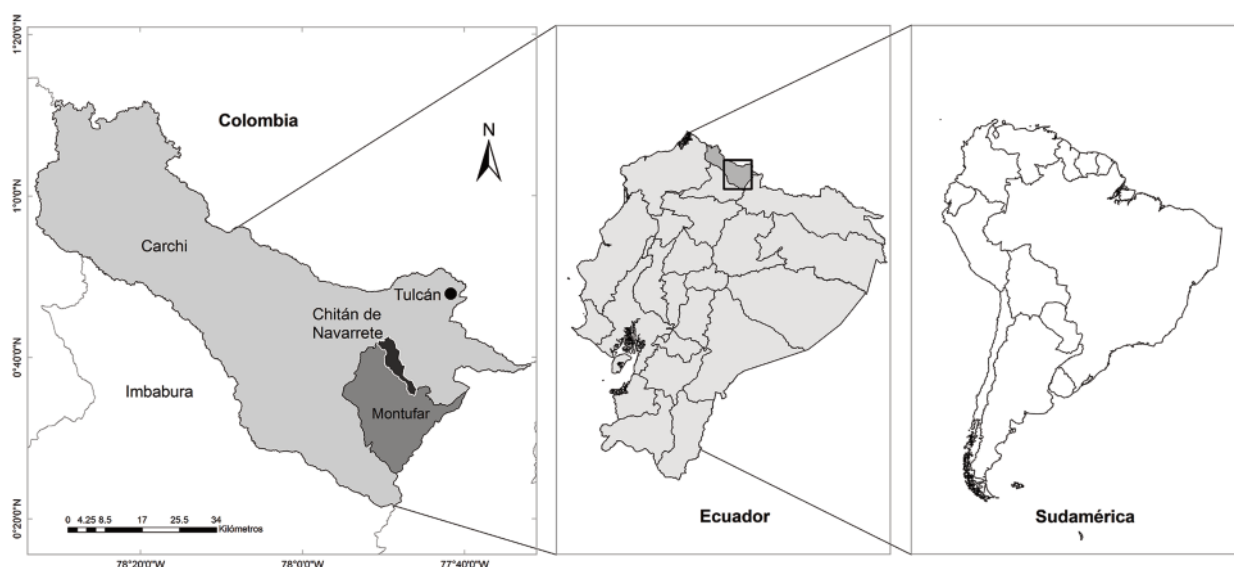


Figura 1. Localización de la parroquia Chitán de Navarrete, cantón Montufar, provincia del Carchi, Ecuador.

Figure 1. Location of the parroquia Chitán de Navarrete, cantón Montufar, provincia del Carchi, Ecuador.



Figura 2. Localización de los sitios de estudio de acuerdo a la pendiente en el páramo de frailejones en Chitán de Navarrete. Alta: pendiente $>30\%$; Media: pendiente entre 15% y 30%; Baja: pendiente $<15\%$.

Figure 2. Location of the study sites according to the slope in the páramo of frailejones in Chitán de Navarrete. Upper: slope $>30\%$; Middle: slope between 15% and 30%; Low: slope $<15\%$.

Las técnicas implementadas fueron: i) Introducción de especie nativa. Consistió en dos plantaciones de *P. incana* con la distribución de las plantas al azar (sin ninguna configuración geométrica). Una de éstas se realizó a menor densidad de plantación, a una distancia de 4 m entre plantas. La otra tuvo una mayor densidad, a una distancia de 2 m entre plantas (Tabla 1). Se implementaron las plantaciones en dos densidades diferentes ya que éstas pueden influir en el desarrollo de las plantas (Kessler 2006). ii) Reubicación de plantas. Consistió en la extracción de plantas de *H. laricifolium* y *H. lancioides*, de 1 m de alto aproximadamente, con una porción de suelo de 1600 cm² alrededor de la planta y con una profundidad de 40 cm; durante la extracción se evitó causar el menor impacto a las raíces. La extracción de las plantas se realizó de áreas no perturbadas con alta densidad de individuos; estas áreas se encontraban a una distancia aproximada de 1 km de las parcelas de estudio; y la distancia entre plantas extraídas fue no menor a 30 m. Previo a la reubicación de las plantas se realizó el labrado del suelo en las áreas específicas donde se ubicó cada una. *H. laricifolium* y *H. lancioides* fueron ubicadas en parcelas diferentes. Estas especies fueron seleccionadas debido a su capacidad de crecer en áreas perturbadas (Sarmiento et al. 2003). iii) Regeneración natural. Consistió en la selección al azar de plantas de *H. laricifolium* y *H. lancioides*, de 10 cm de alto aproximadamente, en parcelas diferentes, para monitorear su regeneración (Tabla 1).

Especies utilizadas

Las especies utilizadas se seleccionaron con base en su presencia en el páramo de frailejones no perturbado o ecosistema de referencia que se encontró a una distancia aproximada de 500 m de las parcelas de estudio. *P. incana* es una especie nativa de Ecuador llamada comunmente Yagual. Es un arbusto que mide de 1 a 5 m de alto, tiene abundante ramificación que nace desde la base del tronco, la copa es difusa e irregular y la corteza es de color rojiza brillante que se desprende en forma continua en capas delgadas translúcidas de consistencia papirácea (Fig. 3A). Esta especie tiene flores en racimos, sin corola ni nectario. *P. incana* es de gran importancia ecológica debido a que es una especie pionera, protege el recurso hídrico y sirve como refugio de fauna silvestre (Kessler 2006). Las plantas de *P. incana* utilizadas en el estudio se obtuvieron del vivero del Ministerio del Medio Ambiente de Ecuador ubicado en el municipio de El Ángel, provincia de El Carchi.

H. laricifolium es una especie nativa de Ecuador llamada comunmente Romerillo. Es un arbusto que mide hasta 2 m de alto, tiene las ramas principales erectas a expandidas, tallos tetralineados cuando las plantas son jóvenes, eventualmente terete, corteza de los tallos exfoliante y fisurada. Tiene flores en racimos, de color amarillo, axilares, con brácteas que las sostienen (Fig. 3B). *H. lancioides* es una especie nativa representativa de los páramos en Ecuador. Es un arbusto de hasta 1 m de alto, con tallos erectos,

más o menos terete, corteza fisurada entre y sobre los puentes interfoliares. Tiene inflorescencias en cimas terminales de color amarillo. Esta especie tiene la capacidad de perder poca agua debido a las pequeñas hojas que posee y además soporta la alta irradiación (Fig. 3C) (León-Yañez 2000). *H. laricifolium* y *H. lancioides* son especies pioneras y dominantes en etapas avanzadas de sucesión secundaria (Sarmiento et al. 2003).

Evaluación de la efectividad de las técnicas y especies para la restauración

Uno de los métodos más utilizados para evaluar el éxito de la restauración es medir la supervivencia, el crecimiento (incremento en altura) y el estado fitosanitario de las plantas (UICN 2016). En este estudio se monitorearon estas tres variables con una frecuencia mensual durante 24 meses desde junio de 2016, mes en el que se establecieron los ensayos de restauración. Se monitoreó la supervivencia mediante observación visual, clasificando cada planta como viva o muerta. El análisis de supervivencia se realizó mediante el estimador de Kaplan-Meier, el cual es un estimador de la función de supervivencia. Esta función consiste en una curva de supervivencia escalonada que incorpora información que se produce en cada muerte, de tal modo que presenta la distribución de la supervivencia a través del tiempo (Crawley 2007). Este análisis se realizó en el programa R (Venables et al. 2013). La función de Kaplan-Meier se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\hat{S}_{KM} = \prod_{t_i < t} \frac{r(t_i) - d(t_i)}{r(t_i)}$$

Donde $r(t_i)$ son las plantas vivas, $d(t_i)$ las plantas muertas y $t_i < t$ es el tiempo en el que se realizó la medición.

Los estándares mínimos aceptables de supervivencia fueron adaptados de Elliot et al. (2003) y Román-Dañobeytia et al. (2012). De tal modo que la supervivencia se clasificó como “excelente” cuando la tasa de supervivencia fue $\geq 90\%$, “aceptable” entre 70% y 89%, “marginal” entre 50% y 69%, y “no aceptable” $< 49\%$. La función de Kaplan-Meier y la clasificación de la supervivencia permitieron establecer el éxito de la restauración para cada técnica implementada en términos de supervivencia de las plantas.

La medición de la altura de cada planta se realizó con un flexómetro midiendo desde el suelo, a favor de la pendiente, hasta la yema apical. Posteriormente, se calculó el incremento en altura de las especies en cada una de las técnicas de restauración. Este incremento se obtuvo de la diferencia de las alturas registradas en la última y primera medición de cada planta. Se realizó un análisis de varianza utilizando el test de comparación de medias Tukey ($p < 0.05$) para comparar el incremento en altura de las especies en cada una de las técnicas implementadas. Este análisis tuvo la

Tabla 1. Diseño de los ensayos de restauración en tres sitios con diferente pendiente del terreno en el páramo de frailejones perturbado por incendio.
Table 1. Design of the restoration trials in the three sites with different slopes in the páramo of frailejones perturbed by fire.

| Sitio | Pendiente | Técnica | | | | | |
|-------|-----------|--------------------------------|--------|------------------------|--------|------------------------|--------|
| | | Introducción de especie nativa | | Reubicación de plantas | | Regeneración natural | |
| | | Especie utilizada | Código | Especie utilizada | Código | Especie utilizada | Código |
| S1 | Alta | <i>P. incana</i> | S1lp | <i>H. laricifolium</i> | S1Pum | <i>H. laricifolium</i> | S1Num |
| | | <i>P. incana</i> | S1lpd | <i>H. lancioides</i> | S1Pes | <i>H. lancioides</i> | S1Nes |
| S2 | Media | <i>P. incana</i> | S2lp | <i>H. laricifolium</i> | S2Pum | <i>H. laricifolium</i> | S2Num |
| | | <i>P. incana</i> | S2lpd | <i>H. lancioides</i> | S2Pes | <i>H. lancioides</i> | S2Nes |
| S3 | Baja | <i>P. incana</i> | S3lp | <i>H. laricifolium</i> | S3Pum | <i>H. laricifolium</i> | S3Num |
| | | <i>P. incana</i> | S3lpd | <i>H. lancioides</i> | S3Pes | <i>H. lancioides</i> | S3Nes |

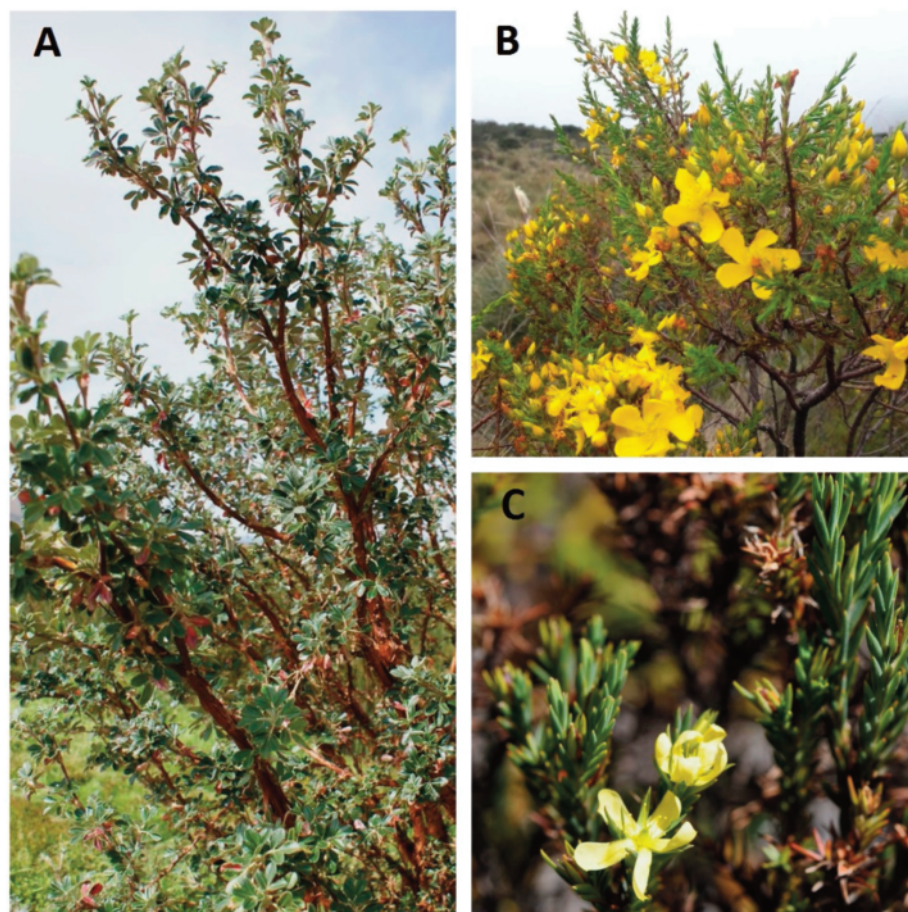


Figura 3. Especies utilizadas en los ensayos de restauración. **A)** *P. incana*; **B)** *H. laricifolium*; **C)** *H. lancoides*.

Figure 3. Species used in restoration trials. **A)** *P. incana*; **B)** *H. laricifolium*; **C)** *H. lancoides*.

finalidad de determinar cuál o cuáles técnicas eran las más exitosas en la restauración, en términos de crecimiento de las plantas en diferentes pendientes del terreno; este análisis fue realizado en el programa R (Venables et al. 2013). Debido a que las plantas monitoreadas en cada una de las técnicas de restauración se encontraban en etapa juvenil se realizaron regresiones exponenciales para analizar la tendencia de crecimiento en altura en función del tiempo (Barrera et al. 2010). El estado fitosanitario de las plantas se monitoreó mediante observación visual y el análisis se realizó con base en la escala de evaluación que fue adaptada de Aguirre et al. (2012) (Tabla 2). Adicionalmente se realizó la prueba de Chi cuadrado para probar si había asociación entre los sitios y las variables medidas.

Resultados

Supervivencia de las plantas

En la técnica introducción de especie nativa, *P. incana* en ambas densidades de plantación registró una supervivencia ³ 90% en los tres sitios, clasificada como “excelente” (Fig. 4A). En la técnica reubicación de plantas las especies *H. laricifolium* y *H. lancoides* registraron una supervivencia que osciló entre el 55% y 95% (Fig. 4B). Ambas especies reportaron la mayor supervivencia ($\pm 80\%$) en el S3, clasificada como “aceptable”; una supervivencia entre 70% y 85% en el S2, “aceptable”; mientras que la menor supervivencia (entre 55% y 60%) se registró en el S1, clasificada como “marginal”. En la técnica regeneración natural las especies *H. laricifolium* y *H. lancoides* registraron una supervivencia que osciló entre el 80% y 100% (Fig. 4C). Ambas especies reportaron la mayor supervivencia en el S2 y S1 ($\pm 90\%$), clasificada como “excelente”, mientras que la menor superviven-

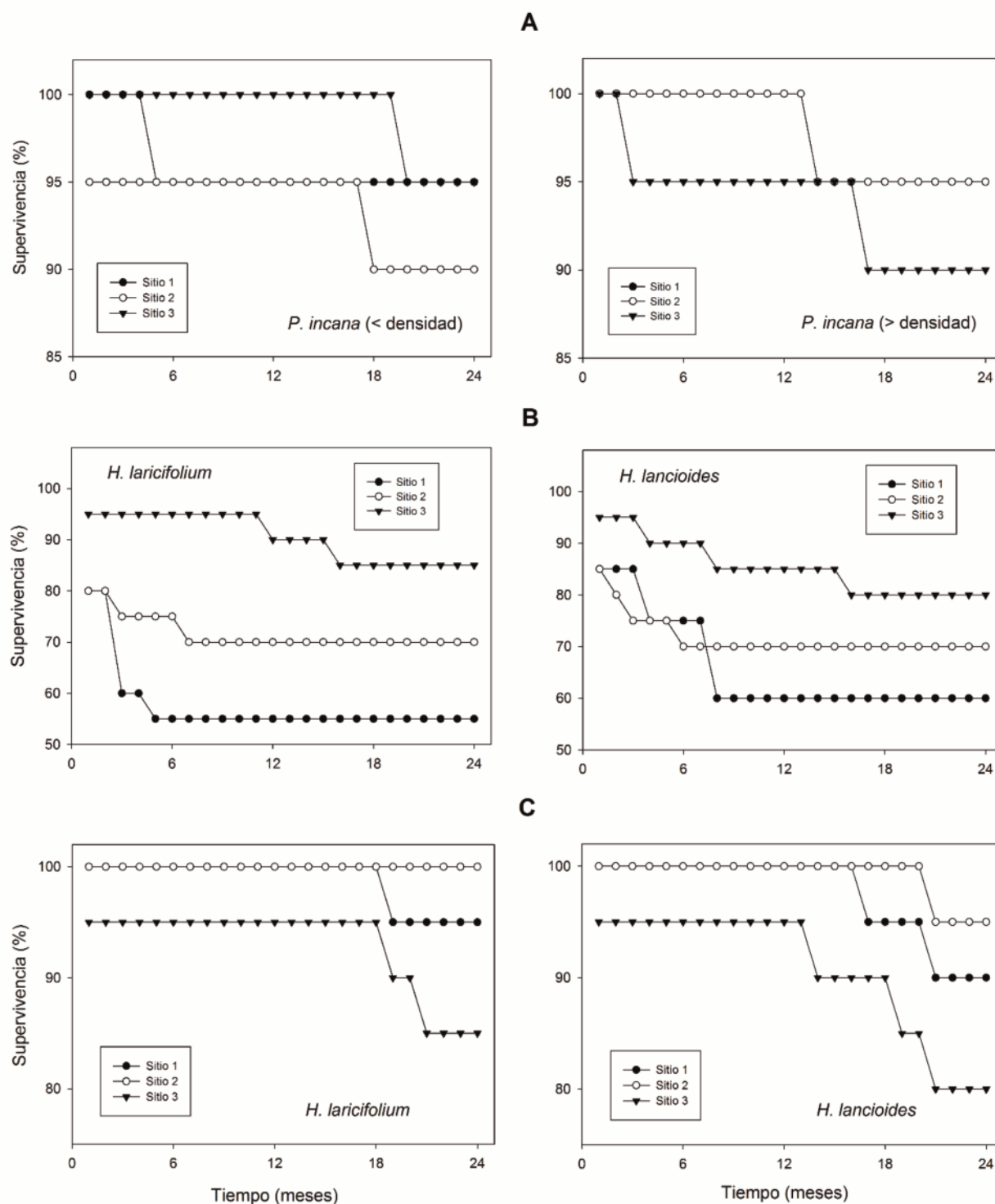
cia se registró en el S3 (entre 80% y 85%), considerada como “aceptable”.

Crecimiento y estado fitosanitario de las plantas

El crecimiento de las plantas presentó diferencias significativas en las tres técnicas implementadas en los tres sitios ($CV = 15.7\%$; Tukey test, $p < 0.05$ $df = 6.04$). El mayor incremento en altura de *P. incana* fue registrado en el S1 para la plantación con menor densidad (14 cm) y en el S3 para la plantación con mayor densidad (16 cm) (Fig. 5A). En la técnica reubicación de plantas las especies *H. laricifolium* y *H. lancoides* registraron su mayor incremento en altura en el S3, 31 cm y 32 cm, respectivamente; mientras que el menor incremento se reportó en el S1 (Fig. 5B). En la técnica regeneración natural las especies *H. laricifolium* y *H. lancoides* registraron su mayor incremento en altura en el S2 y S1, 36 cm y 33 cm, respectivamente; mientras que su menor incremento se reportó en el S3 (Fig. 5C). Las especies nativas en cada una de las técnicas de restauración registraron una tendencia de crecimiento en función del tiempo con un valor de $R^2 > 0.85$. La mejor tendencia de crecimiento de *P. incana* fue registrada en el S1 para la plantación con menor densidad ($R^2 = 0.97$) y en el S3 para la plantación con mayor densidad ($R^2 = 0.96$) (Fig. 6A). En la técnica reubicación de plantas las especies *H. laricifolium* y *H. lancoides* registraron la mejor tendencia de crecimiento en el S3, con un valor de $R^2 = 0.98$ y $R^2 = 0.96$, respectivamente (Fig. 6B). En la técnica regeneración natural las especies *H. laricifolium* y *H. lancoides* registraron la mejor tendencia de crecimiento en el S2 y S1, con un valor de $R^2 = 0.98$ y $R^2 = 0.97$, respectivamente (Fig. 6C). La sanidad de las plantas sobrevivientes registró un valor modal de 4 (Tabla 3). La prueba de Chi cuadrado no fue significativa, por lo tanto, el estado fitosanitario de las especies no estuvo asociado con los diferentes sitios.

Tabla 2. Escala para la evaluación del estado fitosanitario de las plantas.**Table 2.** Scale for the evaluation of the phytosanitary state of the plants.

| Parámetro | Clasificación | Puntaje asignado |
|----------------------|---|------------------|
| Estado fitosanitario | Excelente: sin lesiones de plagas o enfermedades | 4 |
| | Bueno: lesiones en un 25% del área foliar y tallo | 3 |
| | Regular: lesiones en un 50% del área foliar y el tallo | 2 |
| | Malo: lesiones >75% del área foliar y del tallo | 1 |

**Figura 4.** Porcentaje de supervivencia de las especies nativas en las técnicas de restauración: **A)** Introducción de especie nativa; **B)** Reubicación de plantas; y **C)** Regeneración natural.**Figure 4.** Percentage of survival of the native species in the restoration techniques: **A)** Introduction of native species; **B)** Plant relocation; and **C)** Natural regeneration.

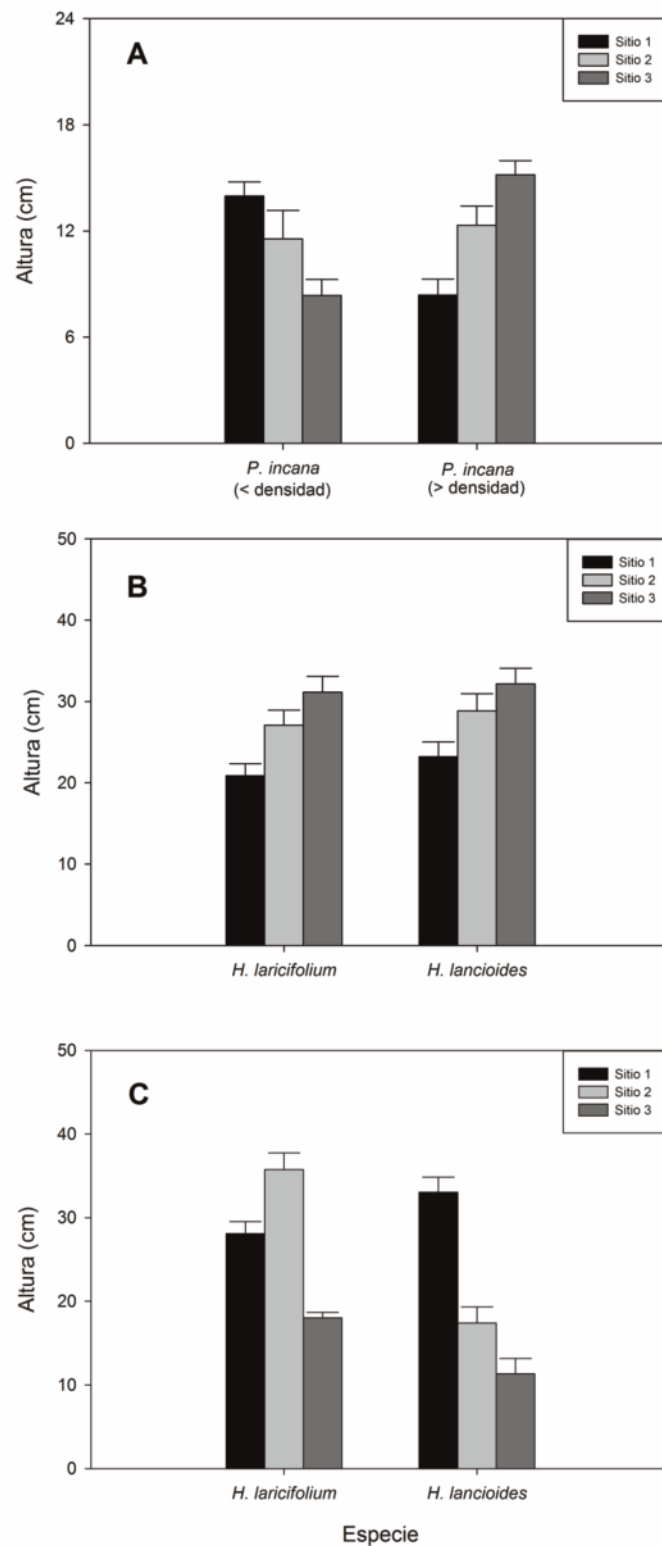


Figura 5. Variación del incremento en altura de las especies nativas en las técnicas de restauración: **A)** Introducción de especie nativa, **B)** Reubicación de plantas, y **C)** Regeneración natural, durante los 24 meses del estudio. Los valores son las medias \pm error estándar ($p < 0.05$).

Figure 5. Variation of the increase in height of native species in the restoration techniques: **A)** Introduction of native species, **B)** Plant relocation, and **C)** Natural regeneration, over the 24 months of the study. Values are mean \pm standard error ($p < 0.05$).

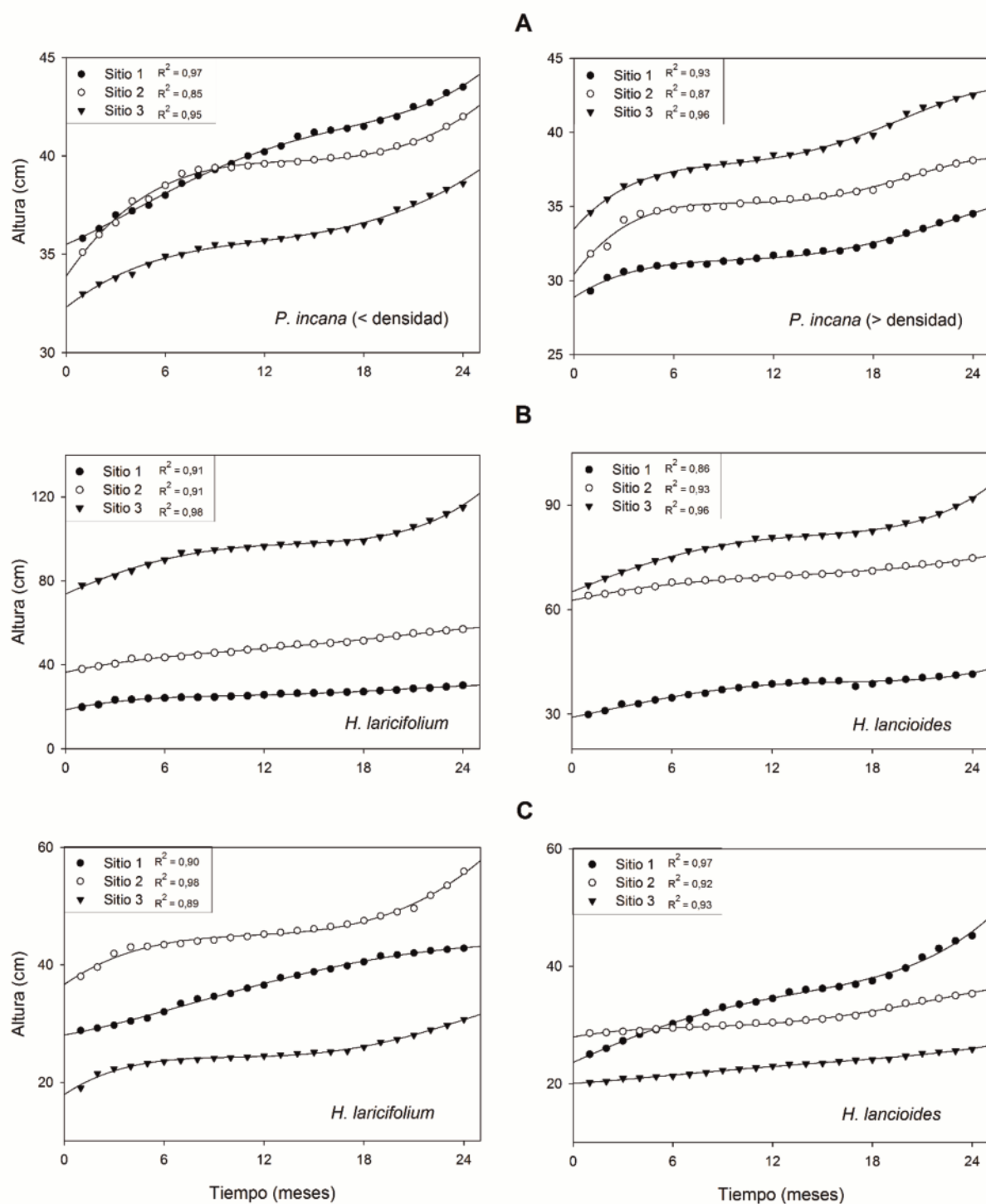


Figura 6. Tendencia de crecimiento de las especies nativas en las técnicas de restauración: **A)** Introducción de especie nativa, **B)** Reubicación de plantas, y **C)** Regeneración natural, durante los 24 meses del estudio.

Figure 6. Growth trend of native species in the restoration techniques: **A)** Introduction of native species, **B)** Plant relocation, and **C)** Natural regeneration, over the 24 months of the study.

Tabla 3. Valores del estado fitosanitario de las especies utilizadas en las tres técnicas para cada uno de los sitios con diferente pendiente del terreno.

Table 3. Values of the phytosanitary status of the species used in the three techniques for each one of the sites with different slopes of the terrain.

| Técnica | | | | | | | |
|---------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|----------------|
| Sitio | Introducción de especie nativa | | Reubicación de plantas | | Regeneración natural | | Moda del sitio |
| | <i>P. incana</i> < densidad | <i>P. incana</i> > densidad | <i>H. laricifolium</i> | <i>H. lancioides</i> | <i>H. laricifolium</i> | <i>H. lancioides</i> | |
| S1 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| S2 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 |
| S3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 |

Discusión

Efectividad de las técnicas de restauración

La efectividad de las técnicas de restauración, para asegurar la recuperación del páramo de frailejones perturbado por incendios, depende de tres variables: del éxito en supervivencia y crecimiento de las plantas y de sus estados fitosanitarios. En general la supervivencia de las especies nativas en las técnicas implementadas en los tres sitios registró un promedio del 87%. El alto porcentaje de supervivencia se debió, probablemente, a dos factores: a) las plantas superaron el estrés de la plantación y/o demostraron adaptabilidad a las bajas temperaturas y al estrés hídrico del entorno (Rojas-Zamora et al. 2013); y b) no registraron lesiones por plagas o enfermedades, que es una de las principales causas de mortalidad (Pérez-Hernández et al. 2011), lo que está en directa relación con el “excelente” estado fitosanitario de las plantas, que favorece el éxito de la restauración (López-Barrera 2015). No obstante, los diferentes porcentajes de supervivencia presentados por las especies nativas en cada una de las técnicas de restauración es un aspecto clave para identificar la efectividad de estas en cada uno de los sitios. Por otra parte, aunque las especies nativas en cada una de las técnicas implementadas registraron un comportamiento de crecimiento regular ($R^2 > 0.85$), lo que indica un crecimiento normal para plantas en estado juvenil (Barrera et al. 2010), el incremento en altura durante los 24 meses de estudio varió significativamente entre sitios (Tukey test, $p < 0.05$ df = 6,04). Esto indica que la pendiente del terreno incidió en el crecimiento de las plantas.

Específicamente, la técnica introducción de especie nativa es exitosa en términos de supervivencia de las plantas de *P. incana* plantadas en ambas densidades en los tres sitios. Mientras que en términos de crecimiento es exitosa en el S1 para plantación de *P. incana* en menor densidad, y en el S3 para plantación de *P. incana* en mayor densidad. Resultados similares fueron reportados para la supervivencia y crecimiento de *P. incana* en los páramos del centro-sur de Ecuador (Aguirre et al. 2012). En altas densidades las plantas crecen más en altura que en biomasa lateral debido a la competencia por la luz para realizar la actividad fotosintética (Damgaard et al. 2002; Suatunce et al. 2010). Sin embargo, en *Polylepis* sp. la actividad fotosintética no constituye la principal restricción para el desarrollo, sino la disponibilidad de agua, de tal modo que una menor disponibilidad de este recurso puede limitar el desarrollo de la especie y más aún en altas densidades de plantación donde existe una mayor competencia intraespecífica por el agua (García-Núñez et al. 2004). En este sentido, una menor disponibilidad de agua en el S1, en relación al S3 que está en cercanía al humedal, pudo ser el factor que incidiera en: i) el menor crecimiento de *P. incana* plantada en mayor densidad, y ii) un mayor crecimiento de *P. incana* plantada en menor densidad debido a una menor demanda de agua (a mayor superficie de suelo por planta menor competencia intraespecífica por agua), lo que pudo no constituir un limitante para su crecimiento. Sin embargo, la mayor disponibilidad de agua en el S3, y asociado a la competencia por la luz, pudo ser un factor clave para que la plantación en mayor densidad registrara un mayor crecimiento. Los resultados de este estudio evidencian que la pendiente del terreno condiciona el crecimiento de *P. incana* plantada en menor o mayor densidad, posiblemente por su incidencia en la disponibilidad de agua. A una mayor inclinación del terreno menor es la infiltración del agua en el suelo y menor es el contenido de humedad en éste (Llambí et al. 2012), lo que puede disminuir la oferta de este recurso y, en parte, condicionar el crecimiento de *P. incana*.

La técnica reubicación de plantas de *H. laricifolium* y *H. lancioides* es exitosa para la restauración en términos de supervivencia de las plantas en el S3 y S2. Mientras que en términos de crecimiento solo es exitosa en el S3. Resultados similares en esta técnica fueron reportados para la supervivencia y crecimiento de *Espeletia grandiflora* en el páramo de Guatavita, Colombia (Rojas-Zamora et al. 2013). La reubicación de plantas es una técnica eficaz para ecosistemas donde los procesos de regeneración son lentos debido a la baja productividad primaria neta, las bajas tem-

peraturas, las altas variaciones de temperatura entre el día y la noche, y los suelos ácidos, tal como ocurre en la alta montaña tropical (Rangel-Ch y Sturm 1995). Los determinantes ambientales del éxito de esta técnica son desconocidos y se atribuye gran importancia al sistema radicular de cada una de las especies vegetales (Rojas-Zamora et al. 2013). Varios autores reportaron que una baja supervivencia y menor crecimiento de plantas reubicadas se debió a efectos de estrés hídrico (Azócar y Rada 2006; Fagua y González 2007). El éxito en crecimiento de las plantas de *H. laricifolium* y *H. lancioides* solo en el S3 puede estar relacionado con la adyacencia de estas con el humedal.

La técnica regeneración natural de *H. laricifolium* y *H. lancioides* es exitosa para la restauración en términos de supervivencia de las plantas en los tres sitios. Mientras que en términos de crecimiento es exitosa en el S2 y S1 para *H. laricifolium* y *H. lancioides*, respectivamente. Resultados similares fueron reportados para la supervivencia y crecimiento de *Hypericum* sp. en los páramos de Guatavita, Colombia, y Buenavista-Chirripó, Costa Rica (Díaz y Torres 2001; Horn 2005). El éxito de la regeneración natural como técnica de restauración requiere que haya ocurrido la reversión de la degradación del ecosistema por sí solo (Vargas et al. 2010). Además, la repoblación de *Hypericum* sp. en sitios quemados depende principalmente de la llegada y establecimiento de propágulos desde la adyacente vegetación no quemada (Kerr et al. 2017). Se evidenció que durante los dos años de estudio ocurrió la reversión de la degradación del páramo de frailejones y que el establecimiento de propágulos de *H. laricifolium* y *H. lancioides* fue efectivo. Es posible que el crecimiento de las plantas en ambas especies solo es exitoso en el S2 y S1, debido a que los mayores incrementos en altura de las plantas pueden reflejar, en parte, una mejoría de la fertilidad del suelo después del descargo de nutrientes por el incendio (Kerr et al. 2017).

Por otra parte, el exceso de agua en el suelo genera profundos cambios físico-químicos en este, el más significativo es la hipoxia o reducción inmediata de la disponibilidad de oxígeno. La hipoxia tiene un efecto negativo sobre la mayoría de plantas terrestres debido a que influye adversamente en la fisiología, reduce su crecimiento e induce la senescencia (Azócar y Rada 2006; Henrique et al. 2010). Específicamente, la hipoxia causa: disminución en la absorción de nutrientes, reducción en la proporción de raíces a tallos, desbalance hormonal, cierre de los estomas y, por ende, limitaciones fotosintéticas, clorosis foliar, cambia el metabolismo de la planta induciendo la vía anaeróbica o fermentativa como mecanismo alterno, aunque poco eficiente para la producción de energía (Lopez 2009; de la Cruz et al. 2012). Las plantas de menor tamaño exhiben una menor adaptación anatómica y fisiológica al estrés hídrico generado por la hipoxia, mientras que las plantas de mayor tamaño lo pueden compensar de mejor manera al presentar tallos más grandes, y por consiguiente médulas más voluminosas (Lopez 2009; Rojas-Zamora et al. 2013). En el presente estudio es posible que ambas especies de *Hypericum* presentaran un mayor crecimiento en la técnica reubicación de plantas en el S3 que está adyacente al humedal, debido a que las plantas en el momento de la reubicación tuvieron un mayor tamaño (1 m aproximadamente) que las plantas en la técnica regeneración natural (10 cm aproximadamente). En consecuencia, es probable que un mayor tamaño les permitió compensar de manera más eficiente el estrés hídrico generado por la hipoxia debido a la cercanía al humedal. Sin embargo, el mayor crecimiento de ambas especies en la técnica regeneración natural se reportó en el S2 y S1, los cuales por la pendiente del terreno pueden presentar un menor almacenamiento de agua (Llambí et al. 2012), lo que podría no generar hipoxia y por ende no limitaría, en parte, el crecimiento de las plantas.

Estrategias de restauración de acuerdo a la pendiente del terreno

De acuerdo a la efectividad de las tres técnicas en los tres sitios con diferente pendiente del terreno, la estrategia de restauración para sitios con pendiente $>30\%$ debe estar conformada por la téc-

nica introducción de especie nativa de *P. incana* en menor densidad y regeneración natural con *H. lancioides* (Tabla 4). Para sitios con pendiente entre 15% y 30% con las técnicas introducción de especie nativa de *P. incana* en ambas densidades y regeneración natural con *H. laricifolium*. Para sitios con pendiente <15% con las técnicas introducción de especie nativa de *P. incana* en mayor densidad y reubicación de plantas con *H. laricifolium* y *H. lancioides* (Tabla 4). Se debe favorecer la implementación de estas estrategias para la restauración exitosa del páramo de frailejones perturbado por incendios.

Conclusiones

Este estudio constituye el primer análisis, realizado en Ecuador, sobre las estrategias que se deben emplear para restaurar el páramo de frailejones perturbado por incendios. Los resultados indican que las tres técnicas y las tres especies, con “excelente” estado fitosanitario, no tienen la misma efectividad de restauración en cada uno de los tres sitios con diferente inclinación del terreno, por lo tanto, las estrategias de restauración son diferentes según la pendiente. La diferencia en efectividad entre técnicas y especies para cada sitio con diferente pendiente puede estar relacionada con factores como la disponibilidad de agua y las características propias de cada especie. Las estrategias propuestas son el primer paso para la exitosa restauración del páramo de frailejones perturbado por incendio. Es decir, las estrategias propuestas son el conjunto de técnicas efectivas que pueden ser utilizadas de manera complementaria en el tiempo y en el espacio para restaurar este ecosistema después de una particular perturbación como son los incendios no prescrito. Por lo tanto, este estudio contribuye en el diseño y planificación de la restauración de este importante ecosistema altoandino. Por último, se recomienda realizar estudios que evalúen la influencia de la disponibilidad de agua en el suelo, de acuerdo a la pendiente del terreno, en el crecimiento de las especies nativas *P. incana*, *H. laricifolium* y *H. lancioides* en las técnicas de restauración: introducción de especie nativa, reubicación de plantas y regeneración natural en el ecosistema páramo de frailejones, con el fin de generar conocimiento clave que permita complementar las bases científicas que guían las acciones de restauración en este ecosistema.

Agradecimientos

Al proyecto “Restauración de ecosistemas degradados y su contribución en el manejo sustentable de paisajes en el norte de Ecuador”, del cual hizo parte esta investigación. Al Ministerio del Ambiente de Ecuador por la donación de las plantas de *P. incana*. A los estudiantes de las carreras de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables e Ingeniería en Biotecnología de la Universidad Técnica del Norte que participaron en la plantación. Especialmente a los Ingenieros Margareth Leiton, Micaela Males, Carlos Sandoval, Brenda Ayala y Marco Camacás quienes ayudaron en los monitoreos. Agradezco los comentarios recibidos de los revisores anónimos.

Referencias

- Aguirre, N., Ordóñez, L., Hofstede, R. 2012. *Comportamiento inicial de especies forestales plantadas en el páramo*. ECOPAR, Quito, Ecuador.
- Aguirre, N., Torres, J., Velasco-Linares, P. 2013. *Guía para la restauración ecológica de los páramos del Antisana*. Serie de Investigación, Fondo para la Protección del Agua - FONAG, Quito, Ecuador.
- Armenteras, D., González, T.M., Vargas, J.O., Meza Elizalde, M.C., Oliveras, I. 2020. Incendios en ecosistemas del norte de Suramérica: avances en la ecología del fuego tropical en Colombia, Ecuador y Perú. *Caldasia* 42(1): 1-16.
- Aronson, J., Aguirre, N., Muñoz, J. 2010. Ecological Restoration for Future Conservation Professionals: Training with Conceptual Models and Practical Exercises. *Ecological Restoration* 28(2): 175-181.
- Azócar, A., Rada, F. 2006. Relaciones hídricas. En: Azócar, A., Rada, F. (eds.), *Ecofisiología de plantas de páramo*, pp. 99-127. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes, Venezuela.

Tabla 4. Estrategias de restauración para cada sitio con diferente pendiente en el páramo de frailejones perturbado por incendio, de acuerdo a la efectividad de las técnicas en términos de supervivencia, crecimiento y estado fitosanitario de las plantas.

Table 4. Restoration strategies for each site with different slopes in the páramo of frailejones perturbed by fire, according to the effectiveness of the techniques in terms of plant survival, growth and phytosanitary state of the plants.

| Estrategia | Técnica | | |
|------------------------|--------------------------------|------------------------|----------------------|
| | Introducción de especie nativa | Reubicación de plantas | Regeneración natural |
| Sitios pendiente alta | Ip | Ninguna | Nes |
| Sitios pendiente media | Ip y Ipd | Ninguna | Num |
| Sitios pendiente baja | Ipd | Pum y Pes | Ninguna |

Ip= Introducción de especie nativa de *P. incana* en menor densidad, Ipd= Introducción de especie nativa de *P. incana* en mayor densidad, Pum = Reubicación de plantas con *H. laricifolium*, Pes = Reubicación de plantas con *H. lancioides*, Num = Regeneración natural con *H. laricifolium*, Nes = Regeneración natural con *H. lancioides*.

- Barrera, J., Suárez, D., Melgarejo, L. 2010. Análisis de crecimiento en plantas. En: Melgajero, L.M., (ed), *Experimentos en Fisiología Vegetal*, pp. 25-37. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Bremer, L.L., Farley, K.A., DeMaagd, N., Suárez, E., Cárate Tandalla, D., Vasco Tapia, S., et al. 2019. Biodiversity outcomes of payment for ecosystem services: lessons from páramo grasslands. *Biodiversity and Conservation* 28: 885-908.
- Buytaert, W., Deckers, J., Dercon, G., de Bievre, B., Poesen, J., Govers, G. 2002. Impact of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in south Ecuador. *Soil Use and Management* 18: 94-100.
- Cárdenas, G., Vargas, O. 2008. Rasgos de historia de vida de especies en una comunidad vegetal alterada en un Páramo húmedo (Parque Nacional Natural Chingaza). *Caldasia* 30: 245-264.
- Céleri, R. 2010. Estado del conocimiento técnico científico sobre los servicios ambientales hidrológicos generados en los Andes. En: Quintero, M., (ed), *Servicios Ambientales Hidrológicos en la Región Andina*, pp. 25-45. CONDESAN, IEP, Lima, Perú.
- Correa, A., Windhorst, D., Crespo, P., Céleri, R., Feyen, J., Breuer, L. 2016. Continuous versus event based sampling: how many samples are required for deriving general hydrological understanding on Ecuador's páramo region? *Hydrological Processes* 30: 4059-4073.
- Crawley, M.J. 2007. *The R book*. John Wiley y Sons Ltd. Hoboken, NJ, Estados Unidos.
- Damgaard, C., Weiner, J., Nagashima, H. 2002. Modelling individual growth and competition in plant populations: growth curves of *Chenopodium album* at two densities. *Journal of Ecology* 90: 666-671.
- de la Cruz, J., Moreno, L.P., Magnitskiy, S. 2012. Respuesta de las plantas a estrés por inundación. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 6(1): 96-109.
- de los Ángeles, C. 2013. *El fuego y el pastoreo en el páramo húmedo de Chingaza (Colombia): efectos de la perturbación y respuestas de la vegetación*. Tesis de Doctorado, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, España.
- de Oliveira, M.T., Damasceno-Junior, G.A., Pott, A., Paranhos-Filho, A.C., Rondon-Suarez, I., Parolin, P. 2014. Regeneration of riparian forests of the Brazilian Pantanal under flood and fire influence. *Forest Ecology and Management* 331: 256-263.
- Díaz, W., Torres, C. 2001. Estudio básico de restauración vegetal en áreas de subpáramo degradadas de la vereda Monquentiva-Guatavita. *Colombia Forestal* 7(14): 116-123.
- Duncan, R.S., Anderson, C.B., Sellers, H.N., Robbins, E.E. 2008. The Effect of Fire Reintroduction on Endemic and Rare Plants of a Southeastern Glade Ecosystem. *Restoration Ecology* 16(1): 39-49.

- Elliott, S., Navakitbumrung, P., Kuarak, Ch., Zangkum, S., Anusarnsunthorn, V., Blakesley, D. 2003. Selecting framework tree species for restoring seasonally dry tropical forests in northern Thailand based on field performance. *Forest Ecology and Management* 184: 177–191.
- Ellsworth, L.M., Litton, C.M., Leary, J.J.K. 2015. Restoration impacts on fuels and fire potential in a dryland tropical ecosystem dominated by the invasive grass *Megathyrsus maximus*. *Restoration Ecology* 23(6): 955–963.
- Fagua, J.C., González, V.H. 2007. Growth rates, reproductive phenology, and pollination ecology of *Espeletia grandiflora* (Asteraceae), a giant Andean caulescent rosette. *Plant Biology* 9: 127–135.
- Fiallos, L., Herrera, R.S., Velázquez, R. 2015. Flora diversity in the Ecuadorian Páramo grassland ecosystem. *Cuban Journal of Agricultural Science* 49(3): 399–405.
- Franklin, J.F., Johnson, K.N. 2012. A restoration framework for federal forests in the Pacific Northwest. *Journal of Forestry* 110: 429–439.
- GAD 2015. *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial*. Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquia Rural de Chitán de Navarretes, Tulcán, Ecuador.
- García-Núñez, C., Rada, F., Boero, C., González, J., Gallardo, M., Azócar, A., et al. 2004. Leaf gas exchange and water relations in *Polylepis tarapacana* at extreme altitudes in the Bolivian Andes. *Photosynthetica* 42(1): 133–138.
- Giles, M.P., Michelutti, N., Grooms, C., Smol, J.P. 2017. Long-term limnological changes in the Ecuadorian páramo: Comparing the ecological responses to climate warming of shallow waterbodies versus deep lakes. *Freshwater Biology* 63: 1316–1325.
- Henrique, P., Donizeti, J., de Fátima, P., Deuner, S., Silveira, N.M., Zandrea, I., et al. 2010. Physiological and anatomical characteristics of Sibipiruna plants under hypoxia. *Ciência Rural* 40(1): 70–76.
- Hofstede, R. 2014. *Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. UICN, Quito, Ecuador.
- Horn, S.P. 2005. Dinámica de La Vegetación Después de Fuegos Recientes en los Páramos de Buenavista y Chirripó, Costa Rica. En: Kappelle, M., Horn, S.P. (eds.), *Páramos de Costa Rica*, pp. 631–655. Instituto Nacional de Biodiversidad, INBio.
- INEC 2013. *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua*. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Gobierno de la República de Ecuador. Disponible en: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/home/>
- INAMHI 2005. *Estudio Hidrológico del Río Mira*. Estudios e Investigaciones Hidrológicas. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Gobierno de la República de Ecuador. Quito, Ecuador.
- Jordan, A., González, F.A., Zavala, L.M. 2010. Re-establishment of soil water repellency after destruction by intense burning in a Mediterranean heathland (SW Spain). *Hydrological Processes* 24: 736–748.
- Jumbo, Y., Alvarez, P., Torres, S. 2016. Variabilidad espacial del contenido de carbono y de las propiedades químicas del suelo en dos niveles de degradación en la unidad hidrográfica Jatunhuaycu, Reserva Ecológica Antisana. En: Mazón, M., Maita, J., Aguirre, N. (eds.), *Restauración del paisaje en latinoamérica: experiencias y perspectivas futuras*, pp. 110–126. Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
- Kaloudis, S., Tocatlidou, A., Lorentzos, N.A., Sideridis, A.B., Karteris, M. 2005. Assessing Wildfire Destruction Danger: a Decision Support System Incorporating Uncertainty. *Ecological Modelling* 181: 25–38.
- Kerr, M.T., Horn, S.P., Grissino-Mayer, H.D., Stachowiak, L.A. 2017. Annual growth zones in stems of *Hypericum irazuense* (Guttiferae) in the Costa Rica páramos. *Physical Geography* 39(1): 1–13.
- Kessler, M. 2006. Bosques de *Polylepis*. En: Moraes, R., Ollgaard, B., Kvist, L.P., Borchsenius, F., Balslev, H. (eds.), *Botánica Económica de los Andes Centrales*, pp. 110–120. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Kquofi, S. 2011. Degradation of Aesthetic Aspects of the Natural Environment: A Case of Accra, Ghana. *International Journal of Applied Environmental Sciences* 6(1): 71–79.
- León-Yañez, S. 2000. La flora de los páramos ecuatorianos. En: Josse, C., Mena, P.A., Medina, G. (eds.), *La Biodiversidad de los Páramos. Serie Páramo 7*, pp. 5–21. GTP/Abya Yala, Quito, Ecuador.
- Llambí, L., Soto, A., Céleri, R., De Bievre, R., Ochoa, B., Borja P. 2012. *Ecología, hidrología y suelos de páramos. Proyecto Páramo Andino*. Fondo para la Protección del Agua - FONAG, Quito, Ecuador.
- López, O. 2009. Fisiología y ecología de comunidades arbóreas en hábitats inundables. *Acta Biológica Panamensis* 1: 68–86.
- López-Barrera, F. 2015. *Restauración de bosques y selvas. Lección 2.1. Diplomado en línea: Restauración de ecosistemas y servicios ambientales. Edición 2015*. Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas, Madrid, España; Instituto de Ecología A.C., Veracruz, México y El Colegio de la Frontera Sur, Campeche, México.
- MAE 2013. *Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural*. Ministerio del Ambiente, Quito, Ecuador.
- MAE 2015. *Sofocación de Incendio Forestal*. Dirección Provincial Ambiental del Carchi. Ministerio del Ambiente, Protección Ambiental, El Ángel, Ecuador.
- Mena, P., Hofstede, R. 2006. Los páramos ecuatorianos. En: Moraes, M., Ollgaard, O., Kvist, L., Borchsenius, F., Balslev, H. (eds.), *Botánica Económica de los Andes Centrales*, pp. 91–109. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Minaya, V.G. 2017. Ecohydrology of the Andes Páramo Region. Tesis de Doctorado, Delft University of Technology and UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, Países Bajos.
- Moya, D., De Las Heras, J., Ferrandis, P., Herranz, J.M., Martínez-Sánchez, J.J. 2011. Fire resilience and forest restoration in Mediterranean fire-prone areas. *Technology and Knowledge Transfer e-Bulletin* 2: 1–5.
- Murcia, C., Guariguata, M., Peralvo, M., Gálmez, V. 2017. *La restauración de bosques andinos tropicales: Avances, desafíos y perspectivas del futuro*. Documentos Ocasionales. CIFOR. Bogor, Indonesia.
- Olivera, M., Cleef, A. 2009. Vegetation composition and altitudinal distribution of Andean rain forests in El Angel and Guandera reserves, northern Ecuador. *Phytocoenologia* 39: 175–204.
- Pérez-Hernández, I., Ochoa-Gaona, S., Vargas-Simón, G., Mendoza-Carranza, M., González-Valdivia, N.A. 2011. Germinación y supervivencia de seis especies nativas de un bosque tropical de Tabasco, México. *Madera y Bosques* 17(1): 71–91.
- Ramsar 2005. *Estrategia regional de conservación y uso sostenible de los humedales altoandinos*. Ramsar COP9 DOC. 26 Kampala, Uganda.
- Ramsay, P.M. 2014. Giant rosette plant morphology as an indicator of recent fire history in Andean paramo grasslands. *Ecological Indicators* 45: 37–44.
- Rangel-Ch., J.O., Sturm, H. 1995. Consideraciones sobre la vegetación, la productividad neta y la artropofauna asociada en regiones paramunas de la Cordillera Oriental. En: Mora-Osejo, L.E., Sturm, H. (eds.), *Estudios ecológicos del páramo y del bosque altoandino cordillera Oriental de Colombia. Tomo I*, pp. 47–70. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Bogotá, Colombia.
- Rojas-Zamora, O., Insuasty-Torres, J., De los Angeles, C., Vargas, O. 2013. Reubicación de plantas de *Espeletia grandiflora* (Asteraceae) como estrategia para el enriquecimiento de áreas de páramo alteradas (PNN Chingaza, Colombia). *Revista de Biología Tropical* 61(1): 363–376.
- Román-Dañobeytia, F.J., Levy-Tacher, S.I., Aronson, J., Rodríguez, R.R., Castellanos-Albore, J. 2012. Testing the Performance of Fourteen Native Tropical Tree Species in Two Abandoned Pastures of the Lacandon Rainforest Region of Chiapas, Mexico. *Restoration Ecology* 20(3): 378–386.
- Ruffner, C.M., Groninger, J.W. 2006. Making the case for fire in southern Illinois forests. *Journal of Forestry* 104: 78–83.
- Sánchez-Meador, A., Springer, J.D., Huffman, D.W., Bowker, M.A., Crouse, J.E. 2017. Soil functional responses to ecological restoration treatments in frequent-fire forests of the western United States: a systematic review. *Restoration Ecology* 25(4): 497–508.
- Sarmiento, F. 1995. Restoration of equatorial Andes: The challenge for conservation of trop-Andean landscapes in Ecuador. En: Churchill, S., Balslev, H., Forero, E., Luteyn, J.L. (eds.), *Biodiversity and Conservation of Neotropical Montane Forest*, pp. 637–651. The New York Botanical Garden, Nueva York, Estados Unidos.
- Sarmiento, F. 1997. Arrested succession in pastures hinders regeneration of Tropandean forests and shreds mountain landscapes. *Environmental conservation* 24(1): 14–23.
- Sarmiento, F. 2002. Anthropogenic change in the landscapes of highland Ecuador. *Geographical Review* 92(2): 213–234.
- Sarmiento, L., Llambí, L.D., Escalona, A., Marquez, N. 2003. Vegetation patterns, regeneration rates and divergence in an old field succession of the high tropical Andes. *Plant Ecology* 166: 63–74.

- SENPLADES 2017. *El Medio Ambiente*. Disponible en: <https://observatorio.planificacion.cepal.org/es/planes/plan-nacional-de-desarrollo-2017-2021-toda-una-vida-de-ecuador>
- SER 2004. *Principios de SER International sobre la restauración ecológica*. Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas. Society for Ecological Restoration International. Disponible en: <https://www.ser.org/page/SERStandards>
- Suárez, E. 2009. Integridad ecológica frente a salud ecosistémica: reflexiones sobre enfoques de conservación en ecosistemas de Páramo. En: de la Cruz, R., Mena, P., Morales, P., Ortiz, G., Ramón, S., Rivadeneira, E. et al. (Eds), *Gente y ambiente de Páramo: realidades y perspectivas en Ecuador*, pp. 39-51. Ecociencia-Abya Yala, Quito, Ecuador.
- Suárez, E., Medina, G. 2001. Vegetation structure and soil properties in Ecuadorian paramo grasslands with different histories of burning and grazing. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 33:158–164.
- Suatunze, P., Díaz, G., García, L. 2010. Efecto de la densidad de plantación en el crecimiento de cuatro especies forestales tropicales. *Ciencia y Tecnología* 3(1): 23-26.
- Torres-Celi, J., Mazón, M., Aguirre, N. 2016. Evaluación integral de la degradación de un ecosistema de páramo en el Ecuador como base para el establecimiento de un plan de restauración. En: Mazón, M., Maita, J., Aguirre, N. (eds.), *Restauración del paisaje en latinoamérica: experiencias y perspectivas futuras*, pp. 172-183. Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
- UICN 2016. *Restauración funcional del paisaje rural: manual de técnicas. Serie técnica: Gobernanza Forestal y Economía. Número 3*. UICN, Oficina Regional para México, América Central y el Caribe. San José, Costa Rica. Disponible en: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/ST-GFE-no.03.pdf>
- Valencia, J., Lassaletta, L., Velazquez, E., Nicolau, J., Gómez-Sal, A. 2013. Factors controlling compositional changes in a northern Andean Páramo (La Rusia, Colombia). *Biotropica* 45: 18-26.
- van Colen, W., Mosquera, P.V., Hampel, H., Muylaert, K. 2017. Link between cattle and the trophic status of tropical high mountain lakes in páramo grasslands in Ecuador. *Lakes and Reservoirs* 23: 303-311.
- Vargas, O., Reyes, S., Gómez, P., Díaz, J. 2010. *Guías técnicas para la restauración ecológica de ecosistemas*. Grupo de Restauración Ecológica. Departamento de Biología. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Venables, W.N., Smith, D.M., Team, R.C. 2013. *An Introduction to R. notes on R: a programming environment for data analysis and graphics*. Version 3.0.1. Estados Unidos. Disponible en: <http://onlinebooks.library.upenn.edu/webbin/book/lookupid?key=olbp44950>
- Verweij, P.A., Kok, K. 1992. Effects of fire and grazing on *Espeletia hartwegiana* populations. En: Balslev, H., Luteyn, J.L. (eds). *Páramo: An Andean Ecosystem under Human Influence*, pp. 215–229. Academic Press, Londres, Reino Unido.
- Vonshak, M., Dayan, T., Ionescu-Hirsh, A., Freidberg, A., Hefetz, A. 2010. The little fire ant *Wasmannia auropunctata*: a new invasive species in the Middle East and its impact on the local arthropod fauna. *Biological Invasion* 12: 1825-1837.
- Zhang, J., Hull, V., Huang, J., Yang, W., Zhou, S., Xu, W. et al. 2014. Natural recovery and restoration in giant panda habitat after the Wenchuan earthquake. *Forest Ecology and Management* 319: 1-9.
- Zomer, M. 2016. *Fire Ecology of Northern Andean grasslands: Estimating recent fire history and its impact on paramo plants*. Tesis de Doctorado, University of Plymouth, Reino Unido.