

Diagnóstico ecológico, formulación e implementación de estrategias para la restauración de un bosque seco tropical interandino (Huila, Colombia)

Ecological diagnostics, formulation and implementation of strategies for the restoration of an interandean dry tropical forest (Huila, Colombia)

SELENE TORRES-RODRÍGUEZ^{1*}, JULIÁN ESTEBAN DÍAZ-TRIANA¹, ARMANDO VILLOTA¹, WILSON GÓMEZ¹, ANDRÉS AVELLA-M.²

¹Fundación Natura Colombia, Carrera 21 No. 39-43. Bogotá, Colombia. selphilodin@gmail.com*, jediazt.84and@gmail.com, armando58forestral@gmail.com, fernando982@gmail.com

²Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Avenida Paseo Bolívar #16-20, Bogotá, Colombia. eavella@humboldt.org.co

*Autor para correspondencia.

RESUMEN

El diagnóstico ecológico regional es fundamental para planificar procesos de restauración ecológica (RE), especialmente en ecosistemas poco conocidos y amenazados como el Bosque Seco Tropical (bs-T). A partir del diagnóstico ecológico de un bs-T en el departamento de Huila, Colombia, se formuló, implementó e inició el monitoreo de seis estrategias para su restauración. Para los escenarios de restauración se identificaron las barreras a la regeneración natural y sus facilitadores, los ecosistemas de referencia y las especies clave. Con esta información se formularon seis estrategias de restauración: i) nucleación en pastizales abiertos con núcleos entre 2x2 m y 32x32 m con variación en el número de especies (3–30), número de individuos (9–196), ensambles de especies (1–4) y manejo del suelo, ii) siembra bajo árboles nodriza en pastizales arbolados con 37 individuos de seis especies, iii) siembra bajo agrupaciones de árboles con 57 individuos de once especies, iv) ampliación de borde de bosques y arbustales con fajas de 10x5 m con 17 individuos de cinco especies, v) enriquecimiento en arbustales y bosques en módulos hexagonales mono-específicos de siete individuos, y vi) restauración espontánea. La siembra total fue de 54 300 individuos con mayor esfuerzo en la nucleación de 32x32 m con 159 réplicas y 21 676 individuos. El monitoreo a largo plazo permitirá evaluar el desarrollo de trayectorias sucesionales acorde con las referencias y determinar el costo efectividad de las estrategias. Este proceso metodológico de diagnóstico ecológico, formulación, implementación y monitoreo de estrategias puede servir como guía importante para la RE del bs-T en otras localidades.

Palabras clave. Análisis ecológico, barreras a la regeneración natural, nucleación, restauración a escala de paisaje.

ABSTRACT

Ecological diagnostics at a regional level is fundamental for planning processes of ecological restoration (ER), especially in poorly known and threatened ecosystems such as the Dry Tropical Forest (DTF). Based on ecological diagnostics of a DTF in the department of Huila, Colombia, strategies for its restoration were formulated and implemented, and monitoring of those strategies were initiated. For restoration scenarios barriers for natural regeneration and its enhancers were identified, also reference ecosystems were defined, and key species for restoration process were selected. Related to this information, six strategies were formulated: i) nucleation in pastureland with nuclei between 2x2 m and 32x32 m with variation in species

Citación: Torres-Rodríguez S, Díaz-Triana JE, Villota A, Gómez W, Avella-M. A. 2019. Diagnóstico ecológico, formulación e implementación de estrategias para la restauración de un bosque seco tropical interandino (Huila, Colombia). *Caldasia* 41(1):42–59. doi: 10.15446/caldasia.v41n1.71275.

Recibido: 5/abr/2018 **Aceptado:** 12/oct/2018

number (3–30), individuals density (9–196), species assemblages (1–4) and soil management, ii) plantations under nurse trees in wooded pastures with 37 individuals from six species, iii) plantations under tree clusters with 57 individuals of eleven species, iv) expansion of forests and shrublands edges with strips of 10x5 m with 17 individuals of five species, v) enrichment in shrublands and forests with monospecific hexagonal modules of 7 individuals, and vi) spontaneous restoration. A total of 54 300 individuals were planted, and the greatest effort was made in nucleation strategy that was implemented in 32x32 m completing 159 replicates and 21 676 individuals. Monitoring will allow evaluation of successional trajectories development according to references, also to determine cost-effectiveness of strategies. This methodological process of ecological diagnostics, formulation, implementation and monitoring of strategies can serve as an important guide for DTF ecological restoration in other locations.

Key words. Ecological analysis, landscape, nucleation, restoration barriers, restoration.

INTRODUCCIÓN

Según la clasificación de zonas de vida Holdridge, el Bosque Seco Tropical (bs-T) se encuentra en áreas con temperatura anual mayor a 17 °C, precipitación entre 250 y 2000 mm por año y donde la evapotranspiración supera a la precipitación (Holdridge 1967, Murphy y Lugo 1986). La marcada estacionalidad de lluvias que incluye varios meses de sequía (Gentry 1995, Pennington *et al.* 2000, Dirzo *et al.* 2011) limita la productividad primaria y la altura de las plantas (Pennington *et al.* 2000) pero favorece la aparición de adaptaciones morfológicas y fisiológicas a nivel foliar y reproductivo (Pennington *et al.* 2000, Dirzo *et al.* 2011). Presenta alto endemismo y diversidad beta (Dirzo *et al.* 2011), que le confiere altísima prioridad para su restauración ecológica (RE) por su transformación y degradación a nivel mundial. En Colombia se estima una pérdida del 90 % de su extensión original producto de la ganadería, agricultura, minería y asentamientos humanos (Díaz 2006) y es considerado uno de los ecosistemas más amenazados y menos conocidos del país (Pizano y García 2014).

Bajo este escenario, la RE permite asistir la recuperación de ecosistemas (SER 2004), especialmente a escala de paisaje en un mosaico de ecosistemas que interactúan

entre sí (Clewell y Aronson 2013). Cuando el daño es relativamente bajo esta recuperación puede darse mediante el enfoque de regeneración natural o restauración espontánea, tan sólo con el cese de las presiones; pero si el daño es intermedio o alto es necesario el enfoque de regeneración natural asistida o restauración asistida, con intervenciones correctivas para desencadenar la recuperación (McDonald *et al.* 2016). La adecuada selección de uno u otro enfoque de RE depende de un diagnóstico ecológico inicial. Para Andel y Aronson (2006), es necesario empezar con el diagnóstico del problema seguido por la definición de trayectorias para reparar el daño. El entendimiento de la ecología del ecosistema es un primer paso crítico dentro de la RE que junto con los recursos y el objetivo del proyecto permitirán identificar cómo y cuándo se debe intervenir (Holl y Mitchell 2011). La RE para el bs-T se ha enfocado en estudios sobre el conocimiento y manejo de la regeneración natural y a pesar que en algunos casos la RE a escala de paisaje resulte ser difícil, también es factible y necesaria (Aronson *et al.* 2005, Vieira y Scariot 2006). Aunque se han implementado diferentes enfoques y estrategias de restauración (ER) son pocos los trabajos experimentales que describen el proceso de degradación del bs-T y proporcionan métodos de RE en diferentes circunstancias (Sampaio *et al.* 2007, Griscom y Ashton

2011). Para los bosques secos tropicales interandinos de Colombia son escasos los conocimientos sobre su ecología y no se cuenta con experiencias previas de RE.

Este estudio aporta una propuesta científica-técnica para planificar un proceso de RE a partir de un diagnóstico ecológico regional para ecosistemas amenazados como el bs-T interandino del Huila y la cuenca alta del río Magdalena. Este diagnóstico fue el soporte para identificar los escenarios de RE y su nivel de degradación, los ecosistemas de referencia, las barreras y facilitadores a la regeneración natural y las especies clave. A partir de esta información se formularon e implementaron estrategias de RE en un área piloto de 140 ha y se proyectó e inició su monitoreo. Se presenta la fase inicial del proyecto con los objetivos de RE, estados de referencia esperados, especies sembradas en los arreglos florísticos, forma, tamaño, distribución y densidad de los módulos sembrados, acciones de manejo del medio físico y propuesta monitoreo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se ubica en el centro del departamento del Huila (Colombia), dentro del área de compensación ambiental de la Central Hidroeléctrica El Quimbo que comprende 11 079 ha en la zona de vida de bosque seco tropical (bs-T) entre los municipios de El Agrado, Gigante, Garzón y Paicol en un intervalo altitudinal entre los 740–1200 m (Material suplementario – Anexo 1) . La licencia ambiental obligó a la empresa constructora a comprar las 11 079 ha y empezar con una RE piloto en 140 ha durante cuatro años para identificar las mejores ER para escalarlas a toda el área. Por mandato ambiental el área tendrá una vocación de protección estricta a perpetuidad

que empezó en el año 2014, deberá ser gestionada por la empresa durante 20 años para implementar y monitorear las ER y entregarla a una autoridad ambiental que continúe velando por su protección.

Este estudio se desarrolló en el área piloto en tres zonas ecológicas (Avella–M. *et al.* 2019): i) Zona norte (2°22'19,72" Norte, 75°38'25,34" Oeste) con paisaje montañoso estructural y denudacional, temperaturas medias anuales entre 23 y 24 °C, altitud entre 970 y 1110 m, valores promedio anuales de precipitación entre 1100 y 1300 mm y con mayor extensión de bosques; ii) zona central (2°18'26,03" Norte, 75°41'23,04" Oeste) con paisaje de lomerío con procesos de disectación y denudación con temperatura media anual entre 24 y 25 °C, altitud entre los 730 y los 970 m y promedios anuales de precipitación entre 1100 y 1300 mm, dominan pastizales y arbustales y iii) zona sur (2°16'11,97" Norte, 75°41'37,57" Oeste) con paisaje de lomerío y montaña de espinazo asociada a la Serranía del Tigre con temperatura media anual entre 25 y 26 °C, altitud entre los 720 y los 840 m y con mayor déficit hídrico con promedios anuales de precipitación entre 900 y 1100 mm donde dominan pastizales.

Propuesta conceptual y metodológica

Las ER se definieron con base en las orientaciones propuestas por de [SER \(2004\)](#), [Andel y Aronson \(2006\)](#), [Griscom y Ashton \(2011\)](#), [Clewell y Aronson \(2013\)](#) y [McDonald *et al.* \(2016\)](#) (Fig. 1) sobre la realización de un diagnóstico del problema de degradación, definir una referencia para guiar los objetivos de restauración, proponer estrategias usando principios ecológicos y evaluar el avance sucesional. Se realizó un diagnóstico ecológico que permitió priorizar los escenarios para la RE, conocer los factores que los mantienen en su actual estado de

degradación, conocer los elementos del paisaje que pueden facilitar su recuperación, definir ecosistemas de referencia para guiar los estados ecológicos esperados y seleccionar las especies. Con base en este diagnóstico se formularon e implementaron ER y comenzó su monitoreo para conocer la recuperación y respuesta del ecosistema. El proceso se realizó con la participación de representantes de las comunidades locales de la región, aunque ninguna ER se formuló para uso comunitario por el carácter de protección estricta del área.

Diagnóstico ecológico

Para este análisis se adelantaron cuatro pasos: i) definición de escenarios de RE, ii) identificación de barreras y facilitadores de la regeneración natural, iii) definición de ecosistemas de referencia, y iv) selección

de especies. Con la caracterización de la vegetación realizada por [Avella-M. *et al.* \(2019\)](#), el diagnóstico silvicultural y visitas a campo se compararon los levantamientos de vegetación respecto a especies dominantes e indicadoras de avance sucesional, número y cobertura de los estratos, diversidad y fisonomía para definir los escenarios de RE. La identificación de barreras y facilitadores a la regeneración se realizó a partir de evaluaciones rápidas con recorridos de campo y con el apoyo de información de clima, suelos, geomorfología y el análisis de la historia ambiental (Material suplementario – Anexo 2). Con base en las recomendaciones de [Clewell y Aronson \(2013\)](#) se diferenciaron los estímulos externos que generan cambios estresantes o factores exógenos, de los factores propios del medio que tipifican la dinámica natural del ecosistema, llamados factores endógenos.

Estrategias de restauración ecológica

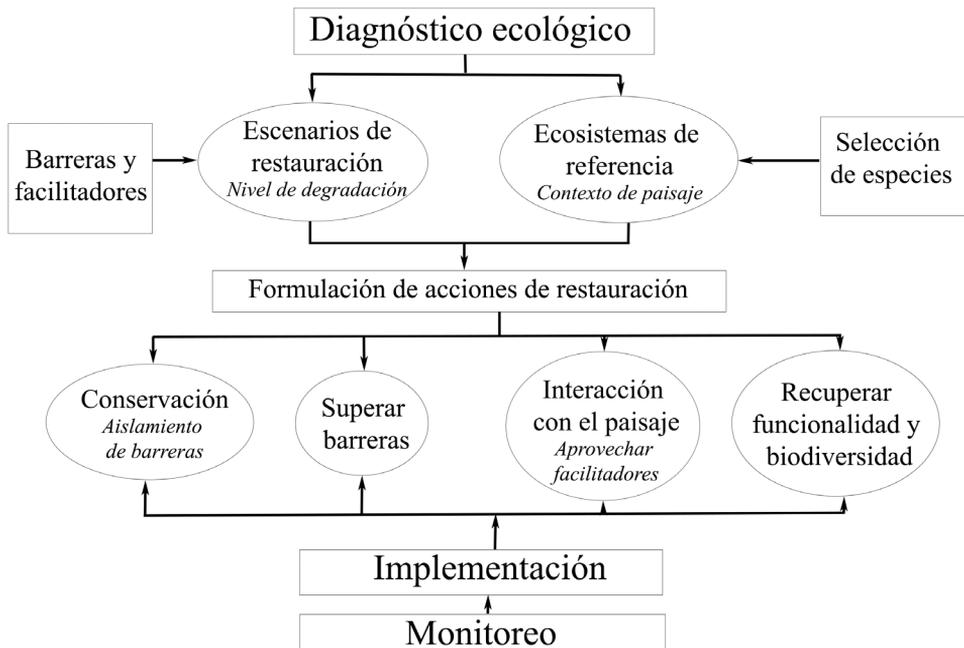


Figura 1. Orientaciones para la formulación de estrategias de restauración ecológica del bosque seco tropical interandino. Adaptado de [Holl y Mitchell \(2011\)](#).

Los ecosistemas de referencia se definieron con la información de los levantamientos de vegetación que presentaron las mejores valoraciones y menores valores ponderados en: diversidad, área basal, abundancia de individuos y cobertura de todos los estratos. Para los bosques se incluyó la altura promedio de los estratos arbóreo inferior, arbolitos y arbustivo.

La selección de especies se realizó a partir de una evaluación multicriterio de la flora regional compuesta por 290 especies teniendo en cuenta aspectos florísticos, estructurales, sucesionales ([Avella-M. et al. 2019](#)), funcionales ([Berdugo et al. ined.](#)), silviculturales y conocimientos de la comunidad local que permitió preseleccionar 68 especies para la RE. Con esta información, las propuestas de [FORRU \(2008\)](#), [Vieira et al. \(2008\)](#) y [Griscom y Ashton \(2011\)](#) y la evaluación de un panel de expertos, se aplicaron ocho criterios para priorizar las especies por escenario de restauración: i) presencia o importancia en ecosistemas de referencia, ii) rol funcional para la restauración, iii) tolerancia y adaptabilidad a condiciones de sitio, iv) capacidad de control de gramíneas invasoras, v) carácter típico en bs-T pero amenazadas a nivel de paisaje, vi) estado sucesional, vii) carácter típico en bs-T pero raras naturalmente y viii) asociación a gremios ecológicos. El criterio ii comprendió potencial de dispersión alto, potencial de dispersión vegetativa, crecimiento rápido, aporte en estructura, alimento para fauna y mejora de suelos; y se tuvo en cuenta solamente si las especies cumplían con tres de ellos. El criterio iii incluyó resistencia a sequía o resistencia a la degradación. Para bosques los criterios de mayor peso fueron en su orden i, vi, v, ii, vii y viii; para los arbustales i, ii, vi, iii, viii y v, y para pastizales i, iv, iii, ii, vi y viii. Los primeros dos criterios tuvieron un peso de seis, los dos siguientes de cuatro y los últimos de dos. El estado sucesional

intermedio y tardío pesó más para bosques y arbustales y para pastizal los estados sucesionales inicial e intermedio. El filtro final para la priorización y propagación de especies fue la disponibilidad de fuentes semilleras en la región.

Formulación e implementación de estrategias de restauración ecológica (RE)

Se definieron objetivos de restauración para cada escenario con base en el diagnóstico ecológico, revisión de proyectos de RE en bs-T en Latinoamérica y un panel de expertos de bs-T. Los objetivos incorporaron el manejo de las barreras, uso de facilitadores y atributos florístico-estructurales esperados respecto a los ecosistemas de referencia. Con base en los enfoques de RE definidos por [McDonald et al. \(2016\)](#) (restauración espontánea y restauración asistida), se definieron las ER. Se desarrolló una fase de campo para evaluar la viabilidad de la implementación de las estrategias dentro de los escenarios de restauración por condición de sitio, pedregosidad, acceso, topografía y logística. Mediante un panel de expertos se definieron factores como: manejo del medio abiótico, ensamblajes de especies, número de especies, densidades de siembra, forma, tamaño y distribución de los módulos de siembra.

Propuesta de monitoreo

El monitoreo de la efectividad ecológica de las ER ([Block et al. 2001](#)) se articuló a su formulación considerando aspectos como la disposición y cantidad de unidades de respuesta, la orientación cardinal y las secuencias de implementación de siembras para obtener unidades homogéneas estandarizadas e independientes, pertinentes para la toma eficiente de datos y la colección de información robusta ([Michener 1997](#)). Se seleccionaron parámetros e indicadores con base en la lista propuesta por [Holl y Cairns](#)

(2002) para el monitoreo de proyectos de RE y se estableció la periodicidad para su seguimiento el corto plazo en cinco años.

RESULTADOS

Diagnóstico ecológico

Escenarios de restauración: Los escenarios de RE priorizados se ubican sobre microcuencas importantes con antiguos tributarios al río Magdalena; en la microcuenca El Pedroso (zona norte), Zanjón de la Mosca (zona centro) y Buenavista, Zanjón de La Capilla, Zanja del Tigre y algunos aferentes al río Magdalena (zona sur) (Material suplementario – Anexo 1). Los pastizales son la cobertura dominante con 53 %, seguidos por arbustales (24 %) y bosques relictuales (22 %) (Tabla 1). De las 290 especies de la flora regional, 79 se encuentran en bosques, 78 en pastizales con dominancia de herbáceas y 58 en arbustales. Los pastizales son el tipo de vegetación más intervenido y se encuentran pastizales abiertos, arbolados y en regeneración. Los arbustales son trayectorias de regeneración de pastizales abandonados; sin embargo, los ubicados sobre laderas en la zona sur son estados avanzados de sucesión cuyas condiciones de suelo y geomorfología limitan el desarrollo de coberturas boscosas. Los bosques son relictos angostos asociados a cuerpos de agua, su vegetación y estructura son fundamentales para conservar las fuentes hídricas temporales o permanentes durante la sequía y algunas pequeñas áreas conservadas se ubican en laderas de difícil acceso.

Barreras y facilitadores a la regeneración natural: Se identificó el déficit hídrico, asociado a la alta radiación y evapotranspiración, el relieve y la pendiente como los principales factores endógenos que condicionan el desarrollo de la vegetación.

Los factores exógenos relevantes producto del antiguo e intenso uso ganadero del territorio son la transformación, compactación y erosión del suelo, fragmentación del paisaje y dominancia de gramíneas exóticas invasoras como *Hyparrhenia rufa* (Nees), *Aristida gibbosa* (Nees) Kunth, *Andropogon bicornis* Forssk., *Andropogon fastigiatus* Sw, *Brachiaria decumbens* Stapf y *Rhynchospora nervosa* (Vahl) Boeckeler. El 30 % del área presenta pendientes superiores al 50 %, el 27 % del área presenta condiciones de erosión severa a muy severa y el 25 % con erosión moderada. Existen suelos con bajos contenidos de materia orgánica P y K, alta pedregosidad, afectados por procesos erosivos y deficiente estructura. La fragmentación estuvo representada en bosques relictuales, aislados, angostos y rodeados por matrices de gramíneas exóticas. Para especies de bosque amenazadas o en riesgo, la disminución excesiva de sus poblaciones constituyó otra barrera.

Los árboles potencialmente nodrizas se identificaron como el facilitador más destacado en la zona centro con individuos de hasta 8 m de altura de especies como *Guazuma ulmifolia* Lam, *Casearia praecox* Griseb y *Maclura tinctoria* (L) y agrupaciones de árboles de especies como *G. ulmifolia*, *M. tinctoria* y *Spondias mombin* L. En la zona norte se encontraron nodrizas de *Attalea butyracea* (Mutis ex L. f.) Wess. Boer y núcleos de regeneración establecidos de 5x10 m con *Machaerium capote* Triana ex Dugand, *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.), *Guapira pubescens* (Kunth) Lundell, *G. ulmifolia*, *Senna spectabilis* (DC.) H.S. Irwin & Barneby, *Inga edulis* Mart, *Cinnamomum triplinerve* (Ruiz & Pav.) Kosterm, *Croton glabellus* L, *Croton hibiscifolius* Kunth ex Spreng y *Casearia corymbosa* Kunth. En la zona sur se encontraron núcleos de 5x5 m con *Zanthoxylum rigidum* Humb. & Bonpl.

Tabla 1. Condiciones biofísicas de los escenarios de restauración.

Escenario de restauración	Geomorfología y Suelos
<p>Pastizales con tres escenarios de regeneración: i) abiertos dominados por gramíneas invasoras exóticas; ii) arbolados con <i>Guazuma ulmifolia</i> Lam que han impulsado la regeneración bajo su dosel y iii) en regeneración con <i>Psidium guianensis</i> SW, varias especies de <i>Croton</i>, <i>Casearia corymbosa</i> Kunth, <i>Senna spectabilis</i> (DC.) H.S. Irwin & Barneby y <i>G. ulmifolia</i>. Los ubicados en la zona seca del sur, sobre pendientes fuertes, suelos muy rocosos y poco profundos son incapaces de soportar vegetación de gran porte y presentan individuos de <i>Zanthoxylum rigidum</i> Humb. & Bonpl. ex Willd, <i>Guettarda malacophylla</i> Standl, <i>Bursera tomentosa</i> (Jacq.) Triana & Planch, <i>Cereus hexagonus</i> (L.) Mill y <i>Eugenia egensis</i> D.C. En la zona norte se encuentran herbazales naturales sobre afloramientos rocosos, suelos pedregosos, en colinas con pendientes muy fuertes con <i>Bothriochloa saccharoides</i> (Sw.) Rydb, <i>Bouteloua repens</i> (Kunth) Scribn. & Merr, <i>Melinis minutiflora</i> P. Beauv, <i>Rhynchospora nervosa</i> (Vahl) Boeckeler e <i>Hyparrhenia rufa</i> (Nees) Stapf asociadas con <i>Croton leptostachyus</i> Kunth, <i>Desmodium barbatum</i> (L.) Benth. & Oerst, <i>Byrsonima crassifolia</i> Steud, <i>Puya floccosa</i> (Linden) E. Morren ex Mez, <i>Myrsine guianensis</i> (Aubl.) Kuntze, <i>Miconia</i> cf. <i>stenostachya</i> y una nueva especie de Bromelia (<i>Pitcairnia huilensis</i> Betancur & N.D. Jiménez E.) endémica para la región.</p>	<p>En las tres zonas se observan tipos de relieve de lomas, glacis de acumulación, lomeríos, terrazas aluviales y planos de inundación de ríos o quebradas. Se determinaron 17 unidades de suelos, para este escenario se observan suelos de los órdenes Inceptisol y Molisol. La acidez por pH o por aluminio intercambiable, la textura y sus modificadores, la profundidad del horizonte superficial son las propiedades principales que generan limitaciones en los suelos.</p>
<p>Arbustales: presentan cuatro estratos, donde domina el estrato arbustivo con una cobertura relativa de 35 % seguido por el de arbolitos con 25 %. Las especies dominantes son <i>G. ulmifolia</i> (32 %), <i>E. egensis</i> (21 %), <i>Croton hibiscifolius</i> Kunth ex Spreng (21 %), <i>Calliandra tolimensis</i> Taub (18 %) y <i>Z. rigidum</i> (16 %). En las zonas con mayor pendiente el estrato arbustivo presenta una mayor cobertura relativa (40 %) con <i>C. hibiscifolius</i> (46 %), <i>G. ulmifolia</i> (33 %) y <i>Aspidosperma cuspa</i> (Kunth) S.F. Blake ex Pittier (18 %). Pueden dividirse en dos tipos: i) arbustales abiertos con agrupaciones de <i>G. ulmifolia</i>, <i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Cham, <i>Sapindus saponaria</i> L y <i>Maclura tinctoria</i> (L.) D. Don ex Steud, importantes en la regeneración natural bajo su dosel e interrumpidos por pastizales y ii) arbustales cerrados con especies típicas de un avance sucesional importante como <i>Machaerium capote</i> Triana ex Dugand, <i>Trichilia hirta</i> L., <i>Simira cordifolia</i> (Hook. f.) Steyerl y <i>Pseudobombax septenatum</i> (Jacq.) Dugand, con poco desarrollo de estratos arbóreos.</p>	<p>Escenarios presentes en tipos de relieve como barras homoclinales, crestas estructural, cuestras, espinazo estructural, lomas y terrazas disectadas o con procesos erosivos, los principales suelos son los entisoles, inceptisoles y grupos indiferenciados con abundancia de afloramientos rocosos. Suelos poco evolucionados limitando el desarrollo vegetativo en la zona sur.</p>
<p>Bosques: domina el estrato arbolitos (51 %), seguido del estrato arbóreo inferior (30 %) y el estrato arbustivo (16 %), con pocos individuos en el estrato arbóreo superior. En pendientes leves dominaron <i>Casearia praecox</i> Griseb (20 %), <i>Guadua angustifolia</i> Kunth (12 %) y <i>P. septenatum</i> (10 %) y en pendiente fuerte <i>M. capote</i> (15 %), <i>Astronium graveolens</i> Jacq (12 %) y <i>P. septenatum</i> (8 %). Los bosques degradados conservan la composición (<i>S. cordifolia</i>, <i>A. graveolens</i>, <i>Guarea guidonia</i> (L.) Sleumer y <i>C. praecox</i>) y la estructura de un bosque típico. En los bosques conservados se encontró <i>Cedrela odorata</i> Ruiz & Pav, <i>Hymenaea courbaril</i> L, <i>Ficus dugandii</i> Standl, <i>Pseudosamanea guachapele</i> (Kunth) Harms y <i>Genipa americana</i> L.; además de especies con poblaciones diezmadas como <i>Samanea saman</i> (Jacq.) Merr, <i>C. odorata</i>, <i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC y <i>Platymiscium pinnatum</i> (Jacq.) Dugand, entre otras; y otras especies casi extintas a nivel local como <i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn, <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb, <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg, <i>Zygia longifolia</i> (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Britton & Rose, <i>Crataeva tapia</i> L y <i>Capparis amplissima</i> Lam.</p>	<p>Bosques asociados a vallecitos coluvio aluviales, terrazas disectadas, lomeríos y crestones homoclinales en zonas aferentes de caños o quebradas. Suelos de los grupos entisol, inceptisol y molisol, los cuales presentan erosión hídrica laminar o en surcos y socavación hídrica. Son superficiales a profundos, bien drenados y los Entisoles son Arenosos, los Inceptisoles son Franco Arenosos y los molisoles son texturas franco arcillosas, hay presencia en superficie y en el perfil de gravilla a Guijarros.</p>

ex Willd, *Eugenia egensis* D.C, *G. pubescens*, *Bursera tomentosa* (Jacq.) Triana & Planch y *Cereus hexagonus* (L.) Mill. Los bosques y arbustales son el principal soporte en hábitat

y recursos alimenticios para la fauna, fuentes de propágulos para la regeneración natural y fuentes semilleras para la propagación de especies a nivel regional.

Ecosistemas de referencia: Para cada escenario de restauración se definió un conjunto de estados que siguen una misma trayectoria hacia un ecosistema de referencia a modo de metas volantes con los que se espera un desarrollo gradual a nivel composición florística, abundancia, área basal y estratos arbustivos y arbóreos (Material suplementario – Anexo 3). Estas referencias pueden ser los estados de transición de los escenarios de restauración producto de la implementación de ER. Para los pastizales se definieron cuatro estados de referencia empezando en el corto y mediano plazo por arbustales en estado inicial de sucesión y arbustales en estado avanzado de sucesión. Se espera que estos últimos sigan su desarrollo hacia bosques secundarios en una trayectoria deseable para consolidarse en bosques recuperados con un aumento en el mediano plazo de la abundancia y riqueza (de 3–4 a 7–12 especies) y la conformación del estrato arbustivo y arbolito. En el largo plazo se espera que siga el aumento hasta 30 especies con el desarrollo de los estratos arbóreo inferior y superior. En los pastizales de ladera de la zona sur la única trayectoria esperada son arbustales con dos estratos y algunas especies características, pero no exclusivas como *Bursera graveolens* (Kunth) Triana & Planch, *Calliandra tolimensis* Taub, *Clusia ellipticifolia* Cuatrec, *C. glabellus*, *E. egensis*, *Eugenia florida* DC, *Chloroleucon mangense* (Jacq.) Britton & Rose, *Astronium graveolens* Jacq, *C. corymbosa*, *M. capote*, *M. Tinctoria*, *Randia armata* (Sw.) D y *Z. rigidum*.

Para los arbustales se definieron tres estados de referencia con los cuales se espera que se aumente la riqueza de 22–25 especies y se conformen los estratos arbolito, arbóreo inferior y arbóreo superior. Se espera la recuperación de la composición florística que inicialmente incluya la aparición en pastizales y aumento en arbustales de *Trichilia hirta* L, *Guarea guidonia*

(L.) Sleumer, *C. tolimensis*, *Guettarda malacophylla* Standl., *C. hibiscifolius*, *Hirtella americana* L, *C. triplinerve*, *Eugenia biflora* (L.) DC, *E. florida* y *Myrsine guianensis* (Aubl.) Kuntze. Posteriormente se espera un establecimiento de *A. butyracea*, *Cecropia peltata* Vell, *Pseudobombax septenatum* (Jacq.) Dugand, *C. triplinerve* y *A. graveolens*. Cuando las condiciones microambientales sean las adecuadas se espera el establecimiento de *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC, *Cedrela odorata* Ruiz & Pav, *A. graveolens* y *A. butyracea* en la zona norte y *C. praecox*, *M. capote*, *Ficus insipida* Willd, *Triplaris cumingiana* Fisch. & C.A. Mey, *A. graveolens* y *P. septenatum* en la zona centro y sur. Para los bosques degradados el paso a una trayectoria más desarrollada tomará al menos dos estados esperando una recuperación de entre ocho y doce especies, aumento de la cobertura relativa de los estratos arbóreos y la recuperación de especies de estados avanzados como *Samanea saman* (Jacq.) Merr, *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn, *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb, *Pseudosamanea guachapele* (Kunth) Harms, *P. septenatum*, *Sapindus saponaria* L, *S. mombin*, *C. odorata*, *T. rosea*, *A. butyracea*, *A. graveolens*, *Amyris pinnata* Kunth, *F. dugandii* Standl, *Bursera simaruba* (L.) Sarg, *Anacardium excelsum* (Bertero & Balb. ex Kunth) Skeels, *G. guidonia*, *Zygia longifolia* (Humb. & Bonpl. ex Willd.), *Crataeva tapia* L, *Capparis amplissima* Lam, *Casearia mollis* K. Schum., *Casearia sylvestris* Sw, *Genipa americana* L, *Swartzia trianae* Benth, *Hymenaea courbaril* L y *Platymiscium pinnatum* (Jacq.) Dugand.

Especies seleccionadas: Se priorizaron 68 especies potencialmente claves para el proceso de RE, de las cuales fue posible propagar 52 por su disponibilidad de semillas en la región. Para cada escenario se priorizaron las especies con calificación superior a ocho en la evaluación multicriterio

(Material suplementario – Anexo 4). De estas 52 especies, 59 % presentan capacidad de rebrote y 70 % son elementos típicos de los ecosistemas de referencia con algunos elementos que abarcan entre 20–38 % del IVI de los bosques de referencia. Se priorizaron 42 especies para la RE de pastizales, 50 % pioneras y el otro 50 % de estados sucesionales intermedios y avanzados, algunas de rápido crecimiento, generadoras de dosel y con amplia capacidad de competir con gramíneas exóticas invasoras, otras proveedoras de hábitat y alimento para la fauna y otras que conformarán los estratos arbolito y arbóreos. Se seleccionaron 40 especies para los arbustales por su capacidad para mejorar las condiciones de los suelos, atraer fauna y aumentar la representatividad del estrato arbolito. Para los bosques se seleccionaron 23 especies de las cuales 16 se encuentran amenazadas regionalmente por sobreexplotación o están pobremente representadas en la región.

Formulación e implementación de estrategias de restauración ecológica (RE)

A partir de la información del diagnóstico ecológico regional se formularon seis ER con cinco estrategias de restauración asistida (RA) y una estrategia de restauración espontánea (RS) como contraste para las otras estrategias (Tabla 2 y Material suplementario – Anexo 5). Las estrategias de RA se basaron en el aislamiento de barreras, ensamble de arreglos florísticos con composiciones y densidades diferentes para cada escenario de restauración y en acciones de mejoramiento del suelo. El objetivo de RE para este bs-T fue aislarlo de los factores exógenos que afectan su recuperación y superar las barreras a la regeneración natural aprovechando los facilitadores presentes en el paisaje para acelerar o promover la recuperación florístico estructural y funcional hacia los ecosistemas de referencia. Se adelantó

una estrategia de articulación con las comunidades e instituciones locales desde el inicio. El principal objetivo social es identificar las mejores estrategias mediante el monitoreo a largo plazo para mejorar la integridad ecológica del área protegida que en el futuro se consolidará en este territorio. Dado el factor endógeno de déficit hídrico, se espera que la implementación de ER y la conservación del área contribuyan al mejoramiento de las microcuencas y los ecosistemas ubicados sobre fuentes hídricas temporales y permanentes. Previo a la implementación de las ER se aisló el área de factores exógenos como la ganadería, el fuego, la extracción de madera y las talas.

Nucleación con arreglos florísticos en pastizales abiertos y en regeneración: Se implementaron tres núcleos de 32x32 m en pastizales abiertos de la zona centro y sur. Cada núcleo incluyó la siembra de especies pioneras, intermedias y avanzadas. En los núcleos de intensidad alta se realizó remoción de gramíneas invasoras y siembra en cuatro arreglos florísticos de 196 individuos pertenecientes a 30 especies. Esta densidad de individuos y especies se determinó a partir de datos florístico–estructurales de los bosques de referencia que presentaron un máximo de 26 a 30 especies y 71 a 106 individuos en 50x10 m. En los núcleos de intensidad intermedia se descompactó el suelo con tractor y se sembró la mitad de los arreglos florísticos, individuos y especies de la estrategia anterior. Los núcleos intermedios de menor intensidad tuvieron las mismas siembras de los núcleos anteriores, pero sin descompactación del suelo. En los pastizales de la zona sur se implementaron núcleos de 2x2 m con nueve individuos de tres especies y en los pastizales de la zona norte núcleos de 10x10 m con 37 individuos de seis especies.

Siembra bajo árboles nodriza: Se sembraron 37 individuos de seis especies

Tabla 2. Estrategias de restauración ecológica propuestas para el área de estudio.

COMPO- NENTES	ESTRATEGIAS DE RESTAURACIÓN				
	Nucleación con arreglos florísticos	Siembra bajo árboles nodriza y agrupaciones de árboles	Enriquecimiento	Ampliación de borde	Restauración espontánea
Escenario de restauración	Pastizales abiertos Pastizales en regeneración	Pastizales arbolados	Arbustales cerrados, arbustales abiertos y bosques degradados	Arbustales cerra- dos, arbustales abiertos y bos- ques degradados	Todos
Objetivo de restauración	Sustituir la matriz de pastos con parches de vegetación producto de la siembra y la regeneración natural, aumentar la biodiversidad y conformar diferentes estratos	Producir efectos de facilitación para acelerar la formación de parches, aumentar la biodiversidad y complejidad estructural	Aumentar la diver- sidad de especies sucesionales avanza- das y la representa- tividad de estratos arbóreos	Aumentar el perímetro de parches de arbus- tales y bosques disminuyendo el área colindante con pastizales	Comparar el desarrollo y avance sucesional en condiciones no asistidas (Control)
Ecosistema de referencia	Mosaico de arbustales y bosques	Mosaico de arbustales y bosques	Bosques	Bosques	Mosaico de arbustales y bosques
Nivel de degradación	Alto	Alto	Intermedio	Intermedio-alto	–
Especies	Pioneras, intermedias y avanzadas	Pioneras, intermedias y avanzadas	Arbustales: interme- días y avanzadas Bosques: avanzadas	Pioneras e inter- medias	No
Número de especies	3 en 4 m ² y 30 en 1000 m ²	6 en nodriza y 11 en agrupación de árboles	9–20 en fragmento 1ha	5 en 50 m ²	–
Número de individuos siembra	9 en 4 m ² y 196 en 1000 m ²	37 en nodriza y 75 en agrupación	100–120 en frag- mento 1ha	17 en 50 m ²	–
Facilitadores	Ninguno	Árboles nodriza aislados y agrupaciones de árboles.	Hábitats adecuados, relictos boscosos	Sombra y regeneración del borde	–
Manejo del suelo	Con y sin descompactación	no	No	no	No
Control de gramíneas invasoras	Remoción y corte	Remoción y corte	No	Remoción	No
Nivel de intervención (esfuerzo, costo, tiempo)	Alto: mayor número de especies y densidad de siembra + manejo del suelo +control de gramíneas	Alto: mayor número de especies y densidad de siembra + manejo del suelo +control de gramíneas	Medio: menor número de especies y densidad de siembra sin manejo del suelo ni control de gramíneas	Medio: menor número de espe- cies y densidad de siembra sin manejo del suelo pero con control de gramíneas	Bajo: sin siembra ni manejo del medio físico
Manejo de la vegetación presente	No	No	Áreas con y sin manejo de renuevos, corte de lianas y ramas secas.	Manejo de renuevos, corte de lianas y ramas secas	No

en dos círculos bajo el dosel de arbolitos de *G. ulmifolia* aislados en la matriz de pastos. El primer círculo a 2,5 m del fuste con ocho individuos de tres especies esciófitas y el segundo círculo a 7 m con 29 individuos de cuatro especies de heliófitas durables. En pastizales con agrupaciones de arbolitos de *G. ulmifolia*, *M. tinctoria* y *S. mombin* se sembraron 71 individuos de once especies en tres círculos de siembra, uno a 2,5 m del fuste del árbol central con ocho individuos de dos especies esciófitas de estados sucesionales avanzados; otro a 5 m con 21 individuos de tres especies esciófitas y otro a 10 m con 42 individuos de seis especies heliófitas.

Enriquecimiento en arbustales y bosques: se realizó manejo silvicultural para mejorar el desarrollo de individuos ya establecidos y generar espacios adecuados para la siembra dentro de los arbustales y bosques con dominancia de una sola especie. Se sembraron módulos hexagonales de 6 m² con siete individuos de la misma especie. El manejo de renuevos se realizó en especies dominantes como *C. corymbosa* y *C. glabellus* para focalizar la inversión de sus recursos en altura y no en más rebrotes. Luego del manejo se sembraron especies para favorecer el desarrollo de los estratos arbolito y arbóreo, atraer fauna y algunas amenazadas. Para los bosques se realizó manejo silvicultural con corte de lianas y ramas secas que afectaban el crecimiento de las especies, se sembraron especies asociadas a la fauna que mejoran el desarrollo de los estratos arbóreos y amenazadas a nivel local-regional. En los arbustales se establecieron estrategias de enriquecimiento con y sin manejo silvicultural para evaluar su efecto sobre el desempeño de las siembras y el desarrollo de la regeneración natural.

Ampliación de borde: Se implementaron franjas de 10x5 m en el borde de transición entre bosques y arbustales, y pastizales de

la zona centro y sur. Se realizó manejo de retoños sobre *C. glabellus* y *C. corymbosa*, corte de lianas y ramas secas y siembra de 17 individuos de cinco especies. En las áreas con mayor sombra se sembraron esciófitas para proveer hábitat y alimento para la fauna.

Durante el año 2015 se implementaron las estrategias con una siembra total de 54 300 individuos de 52 especies. El mayor esfuerzo en implementación correspondió a la nucleación de 32x32 m con 159 réplicas y 21 676 individuos de 40 especies, seguido por la siembra bajo nodrizas con 198 réplicas y 9638 individuos de once especies. En la nucleación de 32x32 m se sembraron 23 970 individuos en 321 parcelas; en el enriquecimiento 11 830 individuos en 1690 módulos hexagonales y en la ampliación de borde 3919 individuos en 234 parcelas. Se efectuó riego por los primeros seis meses, disminuyendo la frecuencia con el tiempo y con menor riego en bosques y arbustales. Se aplicaron fertilizantes químicos (5 gr/L de nitrato de K, 0,5–1 gr/L de Borax, 2 kg/1000L de DAP y 1,5 cc/L de NPX) y orgánicos con residuos naturales de hormigueros y tierra en descomposición con estiércol de vaca. A cada individuo sembrado se aplicó fertilizante, hidrotenedor, turba y repelentes cuando se evidenciaron ataques.

Monitoreo de Estrategias de restauración (RE)

Se definieron formas, dimensiones, cantidad y distribución espacial de parcelas de implementación de las ER como criterios para el monitoreo de efectividad ecológica (Tabla 3). Se inició el seguimiento de la supervivencia y el crecimiento de los individuos sembrados en periodos trimestrales y semestrales respectivamente, con el fin de mostrar los resultados y el éxito en el establecimiento de cada una de las ER en el corto plazo (cinco años). La toma de datos se realizó con el apoyo de técnicos y

operarios de la comunidad local, dejando capital humano capacitado y entrenado en la región. La supervivencia se registró para evaluar el cambio en el porcentaje de individuos vivos y se acompañó del registro de la frecuencia de cinco categorías de afectación fitosanitaria. El crecimiento se registró a partir de la medición de la altura y el diámetro a la altura de la base (DAB) para evaluar su incremento en el tiempo. Se propuso el monitoreo del reclutamiento de plántulas de especies de sucesión intermedia y avanzada para mostrar el impacto de las ER al menos durante los primeros cinco años y realizar comparaciones entre tratamientos con siembra y sin siembra.

DISCUSIÓN

Importancia del diagnóstico ecológico regional

De acuerdo con [Murcia y Guariguata \(2015\)](#) la aparente falta de planificación de algunos proyectos de RE en Colombia está asociada con un bajo nivel en el seguimiento, el establecimiento de una línea base y el monitoreo. La presente contribución incorpora la heterogeneidad ecológica, diferentes escenarios de restauración y condiciones de sitio, la conectividad y la posibilidad de ampliación de fragmentos; información ecológica de base detallada contemplando la mayoría de los lineamientos recomendados en estándares internacionales y un programa de monitoreo. Así se subsanan vacíos nacionales donde se reconoce la ausencia de guías metodológicas para la RE de los distintos ecosistemas del país ([Murcia *et al.* 2017](#)).

El uso real del diagnóstico ecológico para la formulación e implementación de ER logró cerrar en parte las brechas comunes entre la ciencia y la práctica en la RE identificadas por [Cabin *et al.* \(2010\)](#). También facilitó la formulación de ER innovadoras, uno de los

principales desafíos de los proyectos de RE según [Mohr y Covelli \(2018\)](#), donde incluso una respuesta negativa podría ahorrar futuros costos de planificación e implementación y minimizar riesgos al escalar la RE.

Uno de los procesos de RE más innovadores en bs-T a escala de paisaje es el adelantado en Costa Rica por [Janzen \(2002\)](#), de considerable importancia dentro de los esfuerzos mundiales de conservación y RE ([Aronson *et al.* 2005](#)). A escala de paisaje y en diferentes escenarios de RE este estudio combina entre otras, un conjunto de ER que han sido evaluadas independientemente a escala experimental y de parcela, como el desempeño de especies en áreas abiertas (e.g. [Sampaio *et al.* 2007](#), [Fajardo *et al.* 2013](#), [Ferreira y Vieira 2017](#)), al interior de bosques ([Gerhardt 1996](#)) y bajo especies nodriza (e.g. [Santiago-García *et al.* 2008](#), [Encino-Ruiz *et al.* 2013](#)); estudios que aportan conocimientos sobre los determinantes ecológicos que influyen en el desempeño de las especies bajo diferentes tratamientos.

Tanto la comprensión como la predicción de trayectorias sucesionales de RE mediante la siembra han sido poco estudiadas ([Souza y Batista 2004](#)). En este estudio se espera un avance sucesional que puede ser considerado inicial aún después de 30 años de abandono según lo reportado por [Avella-M. *et al.* \(2019\)](#), con una recuperación más lenta de los atributos florísticos que de los estructurales, donde incluso en los bosques están ausentes hasta 20 especies con respecto a escenarios de referencia y muchas especies de estados avanzados presentan abundancias bajas. Esto concuerda con [Suganuma y Durigan \(2015\)](#) para áreas en RE del bs-T de Brasil, donde el tiempo estimado para llegar a los ecosistemas de referencia es más corto para los atributos estructurales que para la composición, y la riqueza de

Tabla 3. Aspectos de monitoreo considerados para las estrategias de restauración ecológica propuestas.

Aspectos de monitoreo	ESTRATEGIAS				
	Nucleación con arreglos florísticos	Siembra bajo árboles nodriza y agrupaciones de árboles	Enriquecimiento	Ampliación de borde	Restauración espontánea (contraste)
Forma de parcela	Cuadrada	Circular	Hexagonal	Rectangular	Todas las anteriores
Dimensiones	ZN: 10 x 10 m ZC: 32 x 32 m ZS: 2 x 2 m	7 m radio	1,5 m radio	5 x 10 m	Todas las anteriores
Número de parcelas (réplicas) viables	ZN: 62 ZC: 159 ZS: 100	130 (árboles aislados) 68 (árboles agrupados)	ZN 461 ZC 761 ZS 468	Arbustales: 69 Bosque: 165	Equivalente a la estrategia activa de contraste
Distancia de separación mínima entre parcelas	ZN: 10 m entre perímetros ZC: 32 m entre perímetros ZS: 2 m entre perímetros	14 y 20 m entre perímetros	3 m entre perímetros	10 m entre perímetros	Según estrategia activa de contraste
Distribución en paisaje	Sistemática desde un punto escogido al azar	A conveniencia	Aleatoria	Sistemática desde un punto escogido al azar	Todas las anteriores
Parámetros/ indicadores de seguimiento para el corto plazo (5 años) y periodicidad	Sistemática desde un punto escogido al azar Supervivencia/ Porcentaje de supervivencia de individuos/ Trimestral con transición a semestral Crecimiento/Incremento de altura (cm) y DAB (mm)/Semestral con transición a anual Reclutamiento de plántulas /Aumento de riqueza y abundancia/Semestral con transición a anual		N/A	Reclutamiento de plántulas /Aumento de riqueza y abundancia/ Semestral con transición a anual	N/A
Resultados esperados a corto plazo (5 años) – arreglos florísticos en ER	Reclutamiento -Aumento del doble de riqueza reportada el primer año -Aumento en abundancia del 50 % con respecto al valor del primer año.	Reclutamiento -Aumento del triple de riqueza reportada el primer año -Aumento en abundancia del 60 % con respecto al valor del primer año.	N/A	Reclutamiento -Aumento del doble de riqueza reportada el primer año. -Aumento en abundancia del 40 % con respecto al valor del primer año	Reclutamiento comparativamente menor para todos los casos
			Porcentaje de supervivencia promedio igual o superior a 50 % Incremento promedio de altura mayor a 3 m Incremento promedio de DAB mayor a 5 cm		N/A N/A N/A

ZN = Zona Norte, ZC = Zona Centro y ZS = Zona Sur

especies arbóreas se aproxima a los bosques secundarios en 40 años pero puede tardar más de 70 años en llegar a un bosque viejo.

Enfoque de las estrategias de restauración ecológica

La siembra en línea recta no es la mejor manera de proceder en los bs-T dada su alta heterogeneidad espacial en la disponibilidad de agua, nutrientes y energía (Aronson *et al.* 2005) y a pesar de ello pocos estudios han probado sembrar en núcleos (Holl *et al.* 2011). En este estudio se esperan resultados ecológicos positivos en reclutamiento y establecimiento para los núcleos de 32x32 m especialmente porque presentan mayor tamaño, porcentaje de área impactada, número de especies y combinación de ensamblajes con respecto a lo probado y recomendado en otros estudios con resultados positivos (e.g. Holl *et al.* 2011). Las islas grandes reciben más visitantes de animales dispersores de semillas (Zahawi y Augspurger 2006); en las plantaciones mixtas hay mayor tasa de crecimiento diametral, productividad y variedad servicios ecosistémicos (Piotto *et al.* 2004) y la combinación de especies aumenta la regeneración natural y resiliencia, porque una dominancia de especies perennes puede retardar la sucesión y un predominio de árboles caducos aumenta la competencia con gramíneas (Souza y Batista 2004).

Se esperan resultados positivos en la efectividad ecológica en la nucleación con descompactación del suelo donde se removieron las gramíneas invasoras desde la raíz y en la nucleación intensiva. En el primer caso porque el control de gramíneas tales como *H. rufa*, reportadas como tensionantes para la regeneración del bs-T (Janzen 2002, Griscom *et al.* 2005 y este estudio), fue clave para el éxito de la restauración del bosque seco en Guanacaste (Janzen 2002), facilita

la siembra (Sampaio *et al.* 2007) y reduce la competencia de las plántulas (Holl 1998). En el segundo caso porque una alta densidad de siembra promueve el establecimiento a corto plazo en una sucesión secundaria, proporciona hábitat para los dispersores, protección parcial de sombra (Parrotta 1993, Souza y Batista 2004) y resiliencia por el mayor número de especies con capacidad de rebrote.

Los árboles aislados y fragmentos de bosques han promovido la RE de bs-T en Costa Rica (Janzen 2002), Brasil (Sampaio *et al.* 2007), Puerto Rico (Santiago-García *et al.* 2008) y Panamá (Griscom *et al.* 2009). La dominancia de *G. ulmifolia* en pastizales es un patrón de facilitación de los bs-T de Latinoamérica, reportada por Esquivel *et al.* (2008) en Nicaragua y Griscom *et al.* (2009) en pasturas de Panamá. Se esperan mejores resultados en esta estrategia en comparación con la nucleación dado que en bs-T se ha demostrado que las plántulas muestran un mayor crecimiento y supervivencia bajo árboles nodriza como *Eysenhardtia polystachya* (Ortega) Sarg (Encino-Ruiz *et al.* 2013) y *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit y la lluvia de semillas es mucho mayor (Santiago-García *et al.* 2008).

En las áreas con estrategias de ampliación de borde de bosque se espera una recuperación más rápida y dinámica que en la nucleación y las nodrizas. La presencia de bosques ribereños es un recurso importante y mayor predictor del éxito de la RS que los árboles aislados porque facilitan la regeneración de bosques secundarios después del abandono de las praderas, especialmente en los bordes, donde los propágulos de especies avanzadas tienen mayores posibilidades de establecerse, existe una mayor riqueza de especies, área basal y densidad de tallos (Griscom *et al.* 2009) y son la principal fuente hídrica,

hábitat y alimento para la fauna en épocas de sequía ([Griscom y Ashton 2011](#)).

Para el enriquecimiento en bosques, aunque en algunas áreas se realizó manejo de renuevos y corte de lianas, no se realizó la apertura del dosel; [Gerhardt \(1996\)](#) encontró que este manejo no siempre proporciona condiciones óptimas para el establecimiento de plántulas en bs-T porque promueve la invasión de gramíneas exóticas invasoras al aumentar la entrada de luz, especialmente en la estación seca cuando la mayoría de las especies pierden sus hojas. El desarrollo de plántulas puede afectarse si la apertura de dosel es muy grande ([Bertacchi et al. 2016](#)), o muy cerrada como en bosques muy antiguos con menor disponibilidad de luz ([Basu y Behera 1993](#)). Incluso después de diez años de RE un bosque puede presentar pastos exóticos invasores cuando hay apertura del dosel en estación seca ([Souza y Batista 2004](#)) afectando el desarrollo del sotobosque ([Parrotta 1993](#)).

Como se desconoce el proceso de regeneración natural del bs-T interandino de Colombia, se planteó la RS para comparar los resultados ecológicos con las estrategias de RA. Algunas investigaciones en pasturas de bosques caducifolios estacionales de Brasil ([Sampaio et al. 2007](#)) sugieren que la sucesión temprana no necesita ser estimulada una vez que la perturbación se detiene y que los esfuerzos intensivos como el arado pueden incluso retardar su recuperación. Estos bosques pueden recuperarse rápidamente después de una perturbación intensa gracias a la alta capacidad de rebrote ([Miller y Kauffman 1998](#), [Janzen 2002](#)). En Brasil, pastizales con cuatro años de abandono desarrollaron árboles de 2 m de altura ([Sampaio et al. 2007](#)) y en Costa Rica árboles de hasta 4,5 m de altura en diez años ([Moline c1999](#)). Esto justifica la RS que tiene un costo de mantenimiento muy bajo y es práctica a nivel de paisaje ([Aide et al. 2000](#)). Sin embargo, el éxito de la RS en

bs-T depende de la presencia y diversidad de árboles remanentes, la naturaleza y cantidad de bosques riparios y heterogeneidad del sitio como pendiente y tipo de suelo ([Griscom y Ashton 2011](#)). En algunos casos el sólo aislamiento del tensionante puede crear una sucesión detenida ([Hopkins 1983](#)). Áreas sembradas con 79 especies nativas siguen dominadas por pioneras y tienen baja riqueza y densidad de leñosas después de nueve años de RE ([Souza y Batista 2004](#)). Finalmente, para consolidar el proceso de restauración es necesario concluir la etapa piloto, continuar con el monitoreo adaptativo a largo plazo, y proyectar las fases siguientes de la RE con base en los resultados de costo–efectividad y la selección las mejores ER que sean apropiadas y adaptables para la implementación en el área de compensación.

PARTICIPACIÓN DE AUTORES

ST, JEDT y AA concepción, diseño, estructuración, análisis, discusión y escritura del documento; ST, JEDT, AA, AV y WG definición de estrategias.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores recibieron apoyo financiero de la Fundación Natura para el desarrollo de la investigación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Fundación Natura Colombia y Emgesa, por apoyar este estudio. A Clara Solano y Francisco Torres, de la Subdirección de Conservación e Investigación de la Fundación Natura. A Carolina Murcia por su asesoría. A Nataly García, Alfonso Triana, Francisco Fajardo, David Jiménez y Katherine Benavides por la caracterización de la vegetación. A Felipe Fajardo y Leslye Muñoz por su liderazgo en la implementación de estrategias. A los auxiliares locales por apoyo en todo el proyecto. A Mary Berdugo por revisión de

estilo. A Francisco Torres y Felipe Fajardo por las fotografías de la implementación.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Los anexos del 1 al 5 se presentan como material suplementario bajo el doi: <https://dx.doi.org/10.15446/caldasia.v41n1.78099>.

LITERATURA CITADA

- Aide TM, Zimmerman JK, Pascarella JB, Rivera L, Marcano-Vega H. 2000. Forest regeneration in a chronosequence of tropical abandoned pastures: implications for restoration ecology. *Restor. Ecol.* 8(4):328–338. doi:10.1046/j.1526-100x.2000.80048.x.
- Andel J, Aronson J. 2006. *Restoration ecology: the new frontier*. Primera edición. Estados Unidos. Blackwell Science Ltd.
- Aronson J, Vallauri D, Jaffre, T, Lowry P II. 2005. Restoring Dry Tropical Forests. En: Mansourian S, Vallauri D, Dudley N., editores. (in cooperation with WWF International). *Forest Restoration in Landscapes: Beyond Planting Trees*. New York: Springer. p. 285–290.
- Avella-M. A, García-G. N, Fajardo-Gutiérrez F, González-Melo A. 2019. Patrones de sucesión secundaria en un bosque seco tropical interandino de Colombia: implicaciones para la restauración ecológica. *Caldasia* 41(1):12–27. doi: 10.15446/caldasia.v41n1.65859.
- Basu S, Behera N. 1993. The effects of tropical soil conversion on soil microbial biomass. *Biol. Fert. Soils* 16:302–304. doi: 10.1007/BF00369310.
- Bertacchi MIF, Amazonas NT, Brancalion PHS, Brondani GE, de Oliveira ACS, de Pascoa MAR, Rodrigues RR. 2016. Establishment of tree seedlings in the understory of restoration plantations: Natural regeneration and enrichment plantings. *Restor. Ecol.* 24(1):100–108. doi: 10.1111/rec.12290.
- Block WM, Franklin AB, Ward Jr. JP, Ganey LJ, White GC. 2001. Design and Implementation of Monitoring Studies to Evaluate the Success of Ecological Restoration on Wildlife. *Restor. Ecol.* 9:293–303. doi:10.1046/j.1526-100X.2001.009003293.
- Cabin RJ, Clewell A, Ingram M, McDonald T, Temperton V. 2010. Bridging restoration science and practice: results and analysis of a survey from the 2009 society for ecological restoration international meeting. *Restor. Ecol.* 18:783–788. doi:10.1111/j.1526-100X.2010.00743.x.
- Clewell AF, Aronson, J. 2013. *Ecological restoration: principles, values, and structure of an emerging profession*. Society for ecological restoration. Segunda edición. Washington, Estados Unidos: Island Press.
- Díaz JM. 2006. *Bosque Seco Tropical Colombia*. Cali, Colombia: Banco de Occidente, I/M Editores.
- Dirzo R, Young HS, Mooney HA, Ceballos G, editores. 2011. *Seasonally dry tropical forests: Ecology and conservation*. Washington DC: Island Press.
- Encino-Ruiz L, Lindig-Cisneros R, Gómez-Romero M, Blanco-García A. 2013. Desempeño de tres especies arbóreas del bosque tropical caducifolio en un ensayo de restauración ecológica. *Bot. Sci.* 91(1):107–114.
- Esquivel MJ, Harvey CA, Finegan B, Casanoves F, Skarpe C. 2008. Effects of pasture management on the natural regeneration of neotropical trees. *J. Appl. Ecol.* 45:371–380. doi:10.1111/j.1365-2664.2007.01411.x.
- Fajardo L, Rodríguez JP, González V, Briceño-Linares JM. 2013. Restoration of a degraded tropical dry forest in Macanao, Venezuela. *J. Arid. Environ.* 88:236–243. doi:10.1016/j.jaridenv.2012.08.009.
- Ferreira MC, Vieira DL. 2017. Topsoil for restoration: Resprouting of root fragments and germination of pioneers trigger tropical dry forest regeneration. *Ecol. Eng.* 103:1–12. doi:10.1016/j.ecoleng.2017.03.006.
- [FORRU] Forest Restoration Research Unit. 2008. *Research for restoring tropical forest ecosystems: a practical guide*. Chiang Mai, Thailand: Biology Department, Science Faculty, Chiang Mai University.
- Gentry A. 1995. Diversity and floristic composition of neotropical dry forest. En: Bullock S, Mooney H, Medina E, editores. *Seasonally Dry Tropical Forest*. First Edition. Cambridge. Reino Unido. Cambridge University. p. 145–149.
- Gerhardt K. 1996. Effects of root competition and canopy openness on survival and growth of tree seedlings in a tropical seasonal dry forest. *Forest Ecol. Manage.* 82:33–48. doi: 10.1016/0378-1127(95)03700-4.
- Griscom HP, Ashton PMS, Berlyn GP. 2005. Seedling survival and growth of three native species in pastures: implications for dry forest rehabilitation. *Forest Ecol. Manage.* 218:306–318. doi: 10.1016/j.foreco.2005.08.026.
- Griscom HP, Griscom BW, Ashton PMS. 2009. Forest regeneration from pasture in the dry tropics of Panama: effects of cattle, exotic grass, and forested riparia. *Restor. Ecol.* 17:117–126. doi: 10.1111/j.1526-100X.2007.00342.x.
- Griscom HP, Ashton PMS. 2011. Restoration of dry tropical forests in Central America:

- A review of patten and process. *Forest Ecol. Manage.* 261(10):1564–1579. doi: 10.1016/j.foreco.2010.08.027.
- Holdridge LR. 1967. *Life Zone Ecology*. San José, Costa Rica: Tropical Science Center.
- Holl KD. 1998. Effects of above and below-ground competition of shrubs and grass on *Calophyllum brasiliense* (Camb.) seedling growth in abandoned tropical pasture. *Forest Ecol. Manage.* 109:187–195. doi: 10.1016/S0378-1127(98)00248-5.
- Holl KD, Cairns J. 2002. Monitoring and appraisal. En: Perrow MR, Davy AJ, editores. *Handbook of Ecological Restoration*. Cambridge U.K: Cambridge University Press. p. 411–432.
- Holl KD, Mitchell A. 2011. When and where to actively restore ecosystems? *Forest Ecol. Manage.* 261(10):1558–1563. doi: 10.1016/j.foreco.2010.07.004.
- Holl KD, Zahawi RA, Cole RJ, Ostertag R, Cordell S. 2011. Planting Seedlings in Tree Islands Versus Plantations as a Large-Scale Tropical Forest Restoration Strategy. *Restor. Ecol.* 19(4):470–479. doi: 10.1111/j.1526-100X.2010.00674.x.
- Hopkins B. 1983. Successional processes. En: Bourliere F, editor. *Tropical Savannas*. New York: Elsevier. p. 605–616.
- Janzen DH. 2002. Tropical dry forest: Area de Conservación Guanacaste, northwestern Costa Rica. En: Perrow M, Davy A, editores. *Handbook of Ecological Restoration, Vol. 2 Restoration in Practise*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. p. 559–583.
- McDonald T, Gann GD, Jonson J, Dixon KW. 2016. International standards for the practice of ecological restoration—including principles and key concepts. Washington, D.C.: Society for Ecological Restoration.
- Michener WK. 1997. Quantitatively evaluating restoration experiments: research design, statistical analysis, and data management considerations. *Restor. Ecol.* 5(4):324–377. doi: 10.1046/j.1526-100X.1997.00546.x.
- Miller PM, Kauffman JB. 1998. Seedling and sprout response to slash-and-burn agriculture in a tropical deciduous forest. *Biotropica* 30:538–546.
- Mohr J, Covelli E. 2018. The business perspective in ecological restoration: issues and challenges. *Restor. Ecol* 26 (2):381–390. doi: 10.1111/rec.12564.
- Moline A. c1999. Tropical dry forest restoration in the Guanacaste Conservation Area, Costa Rica. *Restoration and Reclamation Review*. University of Minnesota, Department of Horticultural Science. University of Minnesota Digital Conservancy. Student On-Line Journal. Vol 4. No. 4. [Revisada en: 10 Mar 2018]. <http://hdl.handle.net/11299/5930>
- Murcia C, Guariguata MR. 2015. La restauración ecológica en Colombia. Tendencias, necesidades y oportunidades. Bogor, Indonesia: Documentos Ocasionales 107. CIFOR.
- Murcia C, Guariguata MR, Quintero-Vallejo E, Ramírez W. 2017. La restauración ecológica en el marco de las compensaciones por pérdida de biodiversidad en Colombia: Un análisis crítico. Bogor, Indonesia: Documentos Ocasionales 176, CIFOR.
- Murphy PG, Lugo AE. 1986. Ecology of tropical dry forest. *Annu. Rev. Ecol, Syst.* 17:67–88. doi: 10.1146/annurev.es.17.110186.000435.
- Parrotta JA. 1993. Secondary forest regeneration on de-graded tropical lands: the role of plantations as foster ecosystems. En: Lieth H, Lohmann M, editores. *Restoration of Tropical Forest Ecosystems*. The Hague, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. p. 63–73.
- Pennington RT, Prado DE, Pendry CA. 2000. Neotropical seasonally dry forests and Quaternary vegetation changes. *J. Biogeogr.* 27:261–273. doi: 10.1046/j.1365-2699.2000.00397.x.
- Piotto D, Viquez E, Montagnini F, Kanninen M. 2004. Pure and mixed forest plantations with native species of the dry tropics of Costa Rica: a comparison of growth and productivity. *Forest Ecol. Manage.* 190:359–372. doi: 10.1016/j.foreco.2003.11.005.
- Pizano C, García H, editores. 2014. *El Bosque Seco Tropical en Colombia*. Bogotá D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).
- Sampaio AB, Holl KD, Scariot A. 2007. Does Restoration Enhance Regeneration of Seasonal Deciduous Forests in Pastures in Central Brazil? *Restor. Ecol.* 15(3):462–471. doi:10.1111/j.1526-100X.2007.00242.x.
- Santiago-García RJ, Colon SM, Sollins P, Van Bloem SJ. 2008. The role of nurse trees in mitigating fire effects on tropical dry forest

- restoration: a case study. *AMBIO* 37:604–608. doi: 10.1579/0044-7447-37.7.604.
- [SER] Society for Ecological Restoration International, Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas. 2004. Principios de SER International sobre la restauración ecológica. Arizona. Estados Unidos. www.ser.org y Tucson: Society for Ecological Restoration International.
- Souza FM, Batista JLF. 2004. Restoration of seasonal semideciduous forests in Brazil: influence of age and restoration design on forest structure. *Forest Ecol. Manage.* 191:185–200. doi: 10.1016/j.foreco.2003.12.006.
- Suganuma M, Durigan G. 2015. Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems. *Restor. Ecol.* 23(3):238–251. doi: 10.1111/rec.12168.
- Vieira DL, Scariot A. 2006. Principles of Natural Regeneration of Tropical Dry Forests for Restoration. *Restor. Ecol.* 14(1):11–20. doi: 10.1111/j.1526-100X.2006.00100.x.
- Vieira DL, Lima VV, Sevilha AC, Scariot A. 2008. Consequences of dry-season seed dispersal on seedling establishment of dry forest trees: Should we store seeds until the rains? *Forest Ecol. Manage.* 256(3):471–481. doi: 10.1016/j.foreco.2008.04.052.
- Zahawi RA, Augspurger CK. 2006. Tropical forest restoration: tree islands as recruitment foci in degraded lands of Honduras. *Ecol. Appl.* 16(2):464–478. doi: 10.1890/1051-0761(2006)016%5B0464:TFRTIA%5D2.0.CO;2.