



Universidad de Concepción

MANUAL DE
RESTAURACIÓN
ECOLÓGICA DE
**BOSQUES
NATIVOS
INVADIDOS
POR AROMO**
(*Acacia melanoxylon* R. Br.)
EN LA REGIÓN DE BIOBÍO

CRISTIAN ECHEVERRIA LEAL

ESTEBAN BUSTAMANTE ROMERO

RODRIGO MORALES RAMIREZ





Universidad de Concepción



Citar como:

Echeverría, C., E. Bustamante, R. Morales. 2023. Manual de restauración ecológica de bosques nativos invadidos por aramo (*Acacia melanoxylon* R. Br.) en la Región del Biobío. Fondo de Investigación del Bosque Nativo de CONAF. Universidad de Concepción, Laboratorio de Ecología de Paisaje, Concepción. 51 p.

Índice

PRESENTACIÓN	5
▶ PARTE 1	
• ¿Qué es la restauración ecológica?	6
• ¿Qué atributos de un ecosistema degradado se buscan recuperar?	6
• ¿Qué es una especie invasora?	6
• Aromo (<i>Acacia melanoxylon</i>)	7
▶ PARTE 2	
ETAPAS DE UN PLAN DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA	10
Etapa 1: Definición del plan de restauración	11
Etapa 2: Diseño del plan de restauración	12
• Caracterización del ecosistema de referencia	12
• Levantamiento de línea base del ecosistema degradado	15
• Definición de objetivos y metas	17
• Selección de aproximación de restauración ecológica	17
• Control de aroma	19
• Habilidad mecánica	19
• Control manual de rebrotes	19
• Control químico de rebrotes	20
• Control biológico de rebrotes	20
• Diseño del patrón espacial de plantación	22
• Área de influencia	23
• Patrones espaciales de las especies arbóreas	23
• Adquisición de plantas	24
• Diseño del programa de monitoreo	25
Etapa 3: Planificación	27
Etapa 4: Implementación de las estrategias de control de aroma	28
▶ Habilitación de sitio para restauración	28
• Construcción y/o mejoramiento de accesos	28
• Construcción y/o mejoramiento de cercos	28
• Habilidad mecánica o roce	28
• Clasificación, acopio y retiro de productos forestales	30
• Triturado de los desechos forestales en el área a restaurar	31
▶ Plantación de especies nativas	32
• Instalación de plantilla de plantación en el sitio de restauración	32
• Control de despacho y traslado de plantas al sitio de restauración	34
• Cuento de plantas y tratamiento de enraizamiento y baño de hidrogel	34
• Distribución de las plantas en el sitio de restauración	35
• Confección de casillas, fertilización y plantación de especies nativas	35
▶ Mantenimiento de rebrotes de aroma	36
• Control manual de rebrotes de aroma	36
• Control químico de rebrotes de aroma	38
• Control biológico de rebrotes de aroma	39
• Replante de especies nativas	41
▶ Rendimientos diarios y costos por hectárea de las actividades de la implementación y mantenimiento	42
Etapa 5: Monitoreo	44
Etapa 6: Evaluación	46
REFERENCIAS	50



PRESENTACIÓN

El presente manual surge en el marco del proyecto de investigación 036/2018 “Estrategias de restauración ecológica en ecosistemas invadidos por *A. melanoxylon*” otorgado por el Fondo de Investigación del Bosque Nativo de la Corporación Nacional Forestal. Este documento explica paso a paso las experiencias adquiridas del proceso de restauración y las estrategias utilizadas para el control de *A. melanoxylon* R. Br. (aromo) y está destinado a profesionales, propietarios y propietarias que deseen iniciar la recuperación de sus bosques nativos en zonas invadidas por aromo.

El equipo del mencionado proyecto está compuesto por los siguientes investigadores (a) y sus especialidades: Dr. Cristian Echeverría de la Universidad de Concepción, restauración ecológica; Dr. Felipe Aburto de la Texas A&M University, rehabilitación de suelos; Dr. Rodrigo Morales de la Universidad Austral de Chile, fitopatología; Dra. Cecilia Smith de la Universidad de los Lagos, ecología de la restauración y Dr. Manuel Estay de la Universidad de Concepción, economía ambiental y recursos naturales. Las actividades de restauración fueron coordinadas y supervisadas por el Sr. Esteban Bustamante y Sr. Sergio Román, ambos ingenieros en Conservación en Recursos Naturales. Las actividades de difusión del proyecto fueron ejecutadas por la Ing. Omayra Toro y los periodistas Cecilia Saavedra y Alejandro Zoñez de Agencia Gradual. Las faenas de restauración fueron ejecutadas por la empresa de servicios forestal AFI, a cargo del Sr. Marcelo Vergara.

Los ensayos de restauración asociados al presente proyecto de investigación fueron instalados en la Unidad Experimental de Restauración Ecológica del Parque Nacional Nonguén a cargo de la Corporación Nacional Forestal de la Región del Biobío. Se agradece enormemente la oportunidad de restauración brindada por representantes de CONAF de la Región del Biobío y, en especial, el apoyo de sus profesionales Sr. Alberto Bordeu, Sr. Jorge Quintana, Sr. Leonardo Araneda y el equipo de guardaparques de la unidad.

Este manual está dirigido a quienes deseen iniciar un proceso de restauración ecológica de bosques nativos en áreas invadidas por aromo (*A. melanoxylon*). Las recomendaciones aquí presentadas consideran un estado arbóreo adulto de los individuos de aromo y cierta densidad. Los principales resultados de este proyecto, compuestos por protocolos de restauración y técnicas de manejo, serán útiles para guiar futuros programas de restauración en la Región del Biobío y otras áreas del país invadidas con esta misma especie u otras leñosas.

Parte 1

- **¿Qué es la restauración ecológica?**

La restauración ecológica de ecosistemas es una disciplina que busca asistir la recuperación de los atributos de la biodiversidad que se han degradado, dañado o destruido debido a la acción humana (Gann et al 2019). La restauración ecológica es necesaria cuando un ecosistema presenta ciertos niveles de degradación que le imposibilitan de volver al estado que tenía antes de la alteración. La restauración ecológica es intencional y busca llevar a un ecosistema a una trayectoria ecológica de recuperación que permita la adaptación a cambios locales y globales, la persistencia y la evolución de las especies que lo componen (Echeverría et al., 2021).

- **¿Qué atributos de un ecosistema degradado se busca recuperar?**

Un proyecto de restauración debería apuntar a la recuperación de ciertos atributos ecológicos de un ecosistema (Gann et al., 2019). Un primer grupo corresponde a aquellos atributos que pueden recuperarse de manera directa producto de la ejecución de las intervenciones en el área del proyecto. Estos atributos corresponden a las condiciones físicas apropiadas para sostener una composición y estructura comunitaria determinada, y facilitar el restablecimiento de procesos ecológicos y el flujo e intercambio de organismos y materiales a nivel de paisaje (Clewel y Aronson, 2013).

Cuando ocurre una recuperación exitosa de estos atributos, surge la recuperación indirecta de otro grupo de atributos que son la complejidad, autoorganización, resiliencia y sustentabilidad ecológica. La recuperación de la funcionalidad ecosistémica puede contribuir a restablecer propiedades emergentes, es decir, la complejidad ecológica. Un proyecto de restauración debería considerar desarrollar estructuras complejas basado en una diversificación de hábitat y diferenciación de nicho (Echeverría et al., 2021).

- **¿Qué es una especie invasora?**

Es una especie naturalizada que se reproduce en grandes cantidades y tienen el potencial de propagarse en un área considerable ocupando hábitat naturales (Herrera et al., 2016), provocando una pérdida de biodiversidad (Pauchard y Shea, 2006), al influir en la dinámica vegetacional, alterando la estructura y composición de las comunidades naturales (Ruiz y Carlton, 2003) (i.e. ciclaje de nutrientes en el suelo) y en consecuencia produciendo una alteración de las capacidades para proporcionar servicios ecosistémicos (Vilà et al., 2010).

Las especies exóticas invasoras representan una de las principales amenazas para la biodiversidad y bienestar humano a nivel mundial (Díaz et al., 2019). Los impactos negativos de estas especies son múltiples, desde consecuencias ambientales, al representar una de las principales amenazas para la biodiversidad a nivel mundial. Las especies invasoras causan múltiples impactos en los sistemas socio-ecológicos, incluyendo la alteración de los ciclos de nutrientes, desestabilizando de las comunidades vegetales, modificación de la composición y estructura de los paisajes, pérdida de servicios ecosistémicos, afectación de los sectores productivos, infraestructura pública y de la calidad de vida de las personas.

- **Aromo (Acacia melanoxylon)**

La especie *A. melanoxylon*, conocida como “aromo” es un árbol de origen australiano de hoja perenne con una amplia distribución en Chile (Figura 1). Puede llegar hasta 30 m de alto, con hojas compuestas de 10-20 cm de largo, folíolos lineares de 3-4 mm de largo (Figura 1). Sus flores llegan a 5-10 mm de largo reunidas en racimos axilares de color amarillo pálido. El fruto es una legumbre de 3-12 cm de largo, con semillas de 3-5 mm de largo. La especie se puede reproducir mediante semillas y es capaz de reproducirse de manera vegetativa (rebrotos), ambas de manera abundante (Quiroz et al., 2009).



Figura 1: Distribución geográfica y características de aromo en Chile.

Parte 2

La restauración ecológica de bosques severamente invadidos por especies exóticas constituye un importante desafío, debido a que la recuperación de atributos ecológicos suele ser difícil y costosa. En esta investigación se ha planteado desarrollar estrategias de restauración ecológica en ecosistemas invadidos por aromo en la zona costera de la Región del Biobío (Figura 2). La investigación se llevó a cabo entre 2019 y 2022 en el Parque Nacional Nonguén, el cual presenta una extensa superficie sometida a invasión de aromo y otras especies exóticas. Al interior del área protegida también se caracterizó el ecosistema de referencia el cual sirvió de modelo para definir las metas y objetivos del ensayo de restauración. En esta sección se describen las etapas de un plan de restauración ecológica en un área invadida por aromo y las estrategias que se sugieren aplicar para el control de la especie.



Figura 2: Área invadida por aromo en el Parque Nacional Nonguén.

ETAPAS DE UN PLAN DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA

De acuerdo con Estándares y Principios Internacionales de la Sociedad de Restauración Ecológica (SER en inglés, Gann et al... 2019), se proponen las siguientes etapas claves a considerar en cualquier plan de restauración (Figura 3).

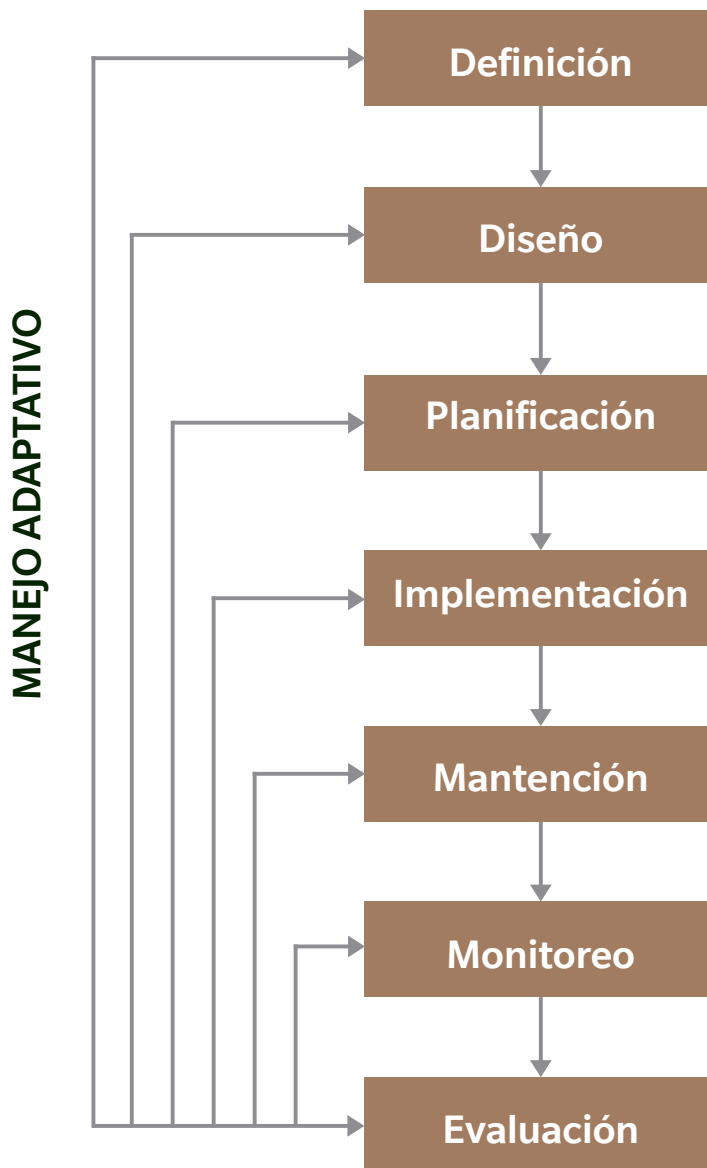


Figura 3. Etapas de un plan de restauración ecológica.

Etapa 1: Definición del plan de restauración

Existen diferentes circunstancias en las cuales un plan de restauración ecológica puede ser desarrollado. Una de ellas puede surgir a petición de un propietario (a) particular que desea recuperar un ecosistema en su propiedad sin ningún tipo de compromiso previo con alguna autoridad ambiental o normativa. En algunos casos puede existir un llamado público de un programa de gobierno para convocar propietarios (as) interesados en restaurar sus ecosistemas. Existen otras instancias en que una empresa debe ejecutar un plan de restauración ecológico en el marco de un compromiso de compensación ambiental. En este último caso, puede suceder que el lugar donde se lleva a cabo la compensación no sea propiedad del titular del proyecto si no de terceros, tales como propietarios o áreas municipales y del Estado disponibles para tal propósito. En este caso se debe establecer un acuerdo formal para garantizar la continuidad del área bajo restauración en el largo plazo.

En esta etapa es fundamental realizar un diagnóstico para precisar si efectivamente existe un área que requiere de restauración ecológica y para comprender el estado de invasión del ecosistema objetivo. Se debe estimar la magnitud y extensión de las acciones que se realizarán y los compromisos que debe adquirir el (la) propietario (a) tales como acceso, documentación, apoyo logístico entre otros. Las acciones a ejecutar estarán definidas en gran medida por el grado de invasión que presenta el ecosistema natural y por la ocurrencia de otras amenazas como la presencia de ganado o explotación maderera.



Los resultados esperados de la etapa de definición son:

- Existencia de un ecosistema invadido por especies exóticas.
- Acuerdo formal con propietario(a), indicando superficie, periodo de restauración y compromisos de mantención.
- Diagnóstico de limitantes ecológicas, sociales, económicas, legales y culturales identificadas.
- Identificación de las unidades productivas al interior del predio y evaluación de su compatibilidad con la restauración ecológica.
- Oportunidades de restauración consensuadas con propietario (a).
- Servicios ecosistémicos y beneficios de la restauración visualizados por propietario (a).
- Estimación general de los costos de plan de restauración.
- Las partes interesadas están informadas.

Etapa 2: Diseño del plan de restauración

En la segunda etapa del plan de restauración se debe realizar la caracterización del ecosistema de referencia y el levantamiento de la línea base del ecosistema degradado. Esta información es fundamental para definir los objetivos y metas del plan. Asimismo, se deben señalar los indicadores ecológicos y sociales que se usarán en un programa de monitoreo y en la posterior evaluación del éxito de la restauración de los sitios degradados.

- **Caracterización del ecosistema de referencia**

Tal como se ha indicado anteriormente, el objetivo fundamental de un proyecto de restauración ecológica es regresar el ecosistema degradado a la trayectoria que hubiese tenido si el disturbio antrópico no hubiese ocurrido. Entonces, para el diseño del plan de restauración ecológica, es necesario estudiar los atributos ecológicos de un ecosistema intacto comparable que actualmente sigue su trayectoria histórica, es decir, un ecosistema de referencia. Por lo general, las áreas protegidas o bien conservadas ofrecen ecosistemas de referencias, siempre y cuando exista una afinidad biogeográfica con la localización del área degradada. Estos ecosistemas de referencia deberían presentar un alto nivel de integridad ecológica, suelen ser estructuralmente complejos y presentan un régimen de disturbios naturales propios del tipo de ecosistema (*Figura 4*). Se espera que estos ecosistemas presenten los atributos ecológicos claves de composición, estructura y función en una condición óptima y libre de amenazas, tales como, rastros de incendios, tocones cortados por acción humana y ausencia de especies invasoras.



Una vez definido el ecosistema de referencia se deben seleccionar específicamente los sitios de referencias en los cuales se establecerán parcelas de muestreo para describir los atributos ecológicos. Se recomienda buscar sitios de referencia con características edáficas, topográficas y climáticas similares a los sitios del ecosistema degradado. La caracterización de los sitios de referencia se hace en términos de los atributos clave definidos en los Estándares de la SER (*Figura 5*). En cuanto a la composición, se describe mediante parcelas de muestreo (*Figura 6*) en las cual se hace un inventario de las especies arbóreas que definen la estructura del sistema, así como también la identidad y riqueza de especies vegetales de diferentes formas de vida (árboles, arbustos, helechos, enredaderas, epífitas y herbáceas). Del punto de vista estructural, se describe las alturas, diámetro y arreglo espacial de los individuos arbóreos en una superficie lo más extensa que se pueda (deseable 0,5 ha o 1 ha). Para caracterizar la estructura del bosque de referencia, se sugiere utilizar la metodología conocida como stem map o mapa de fustes, en la cual se georreferencia cada individuo arbóreo junto con su altura, azimut y distancia al árbol más cercano. De esta forma, se obtiene el patrón o arreglo espacial de los árboles que determina gran cantidad de los procesos del ecosistema.



Figura 4:
Composición y estructura del dosel arbóreo de un bosque caducifolio de referencia en el Parque Nacional Nonguén. (Cristian Echeverría)

Atributos ecológicos clave de un ecosistema de referencia







ATRIBUTO CLAVE	DESCRIPCIÓN	INDICADOR
Ecológico	<p>Condiciones físicas y químicas del sustrato</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido de nutrientes • Carbono orgánico • pH • Densidad aparente • Contenido de materia orgánica • Humedad del suelo • Cationes disponibles • Capacidad de retención de agua
	<p>Composición de especies</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Riqueza y abundancia de árboles remanentes y plantados • Proporción de especies nativas exóticas • Categoría de estado sucesional de especies • Índices de diversidad • Riqueza por forma de vida (herbáceas, epifitas, helechos, arbustos y árboles) • Índices de similitud
	<p>Diversidad estructural</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Rango de altura de árboles dominante • Diversidad de crecimiento en altura • Diversidad de diámetro a la altura del pecho de especies plantadas y regeneradas • Diversidad del diámetro del cuello de especies plantadas • Cobertura de copas • Cobertura de suelo • Índice de mezcla horizontal de especies
	<p>Funciones ecosistémicas</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Regeneración • Biomasa de hojarasca • Diversidad funcional • Dinámica de disturbios naturales
	<p>Ausencia de amenazas</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de especies exóticas • N° de plantas ramoneadas por animales domésticos y lagomorfos
	<p>Intercambio de flujos externos</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de genes, riqueza y abundancia de nuevas especies, flujo hídrico

Figura 5: Atributos clave e indicadores para caracterizar un ecosistema de referencia y ecosistema degradado según los Estándares Internacionales de la SER (2019).

- **Levantamiento de línea base del ecosistema degradado**

En la etapa de diseño del plan se debe realizar un levantamiento de la línea base del ecosistema degradado con el fin de conocer el estado actual de los atributos bióticos y abióticos del ecosistema que se desea restaurar. Para ello se recomienda establecer parcelas de muestreo de 20 x25 m o de un tamaño tal que permita capturar la variabilidad de diferentes indicadores ecológicos que posteriormente se van a monitorear y comparar con la línea base (*Figura 6*). En estas parcelas se caracterizan los atributos clave por ejemplo, abundancia y riqueza de las especies nativas y exóticas presentes, presencia de especies amenazadas, condición física y química del suelo, estructura de la vegetación, entre otras variables. En cuanto a las amenazas, estas deben ser evaluadas en toda el área de restauración, no sólo en las parcelas de muestreo, si no también incluir zonas adyacentes.

Las amenazas puede ser caracterizadas en término de sus causas, frecuencia, intensidad y extensión espacial de los agentes que degradan. En el caso de las especies invasoras, se sugiere tener claro la extensión o distribución de estas especies en el área y los posibles mecanismos de dispersión. Es posible que algunas actividades de implementación de la restauración promuevan aún más su dispersión si no se toman medidas preventivas. En el caso de que sean varias las especies invasoras, es importante saber la estrategias de dispersión de cada una de ellas y la densidad que presentan en el sitio. Se recomienda dejar una o varias parcelas tipo testigo en el área degradada, sin intervención, para evaluar posteriormente el impacto de las acciones de restauración.

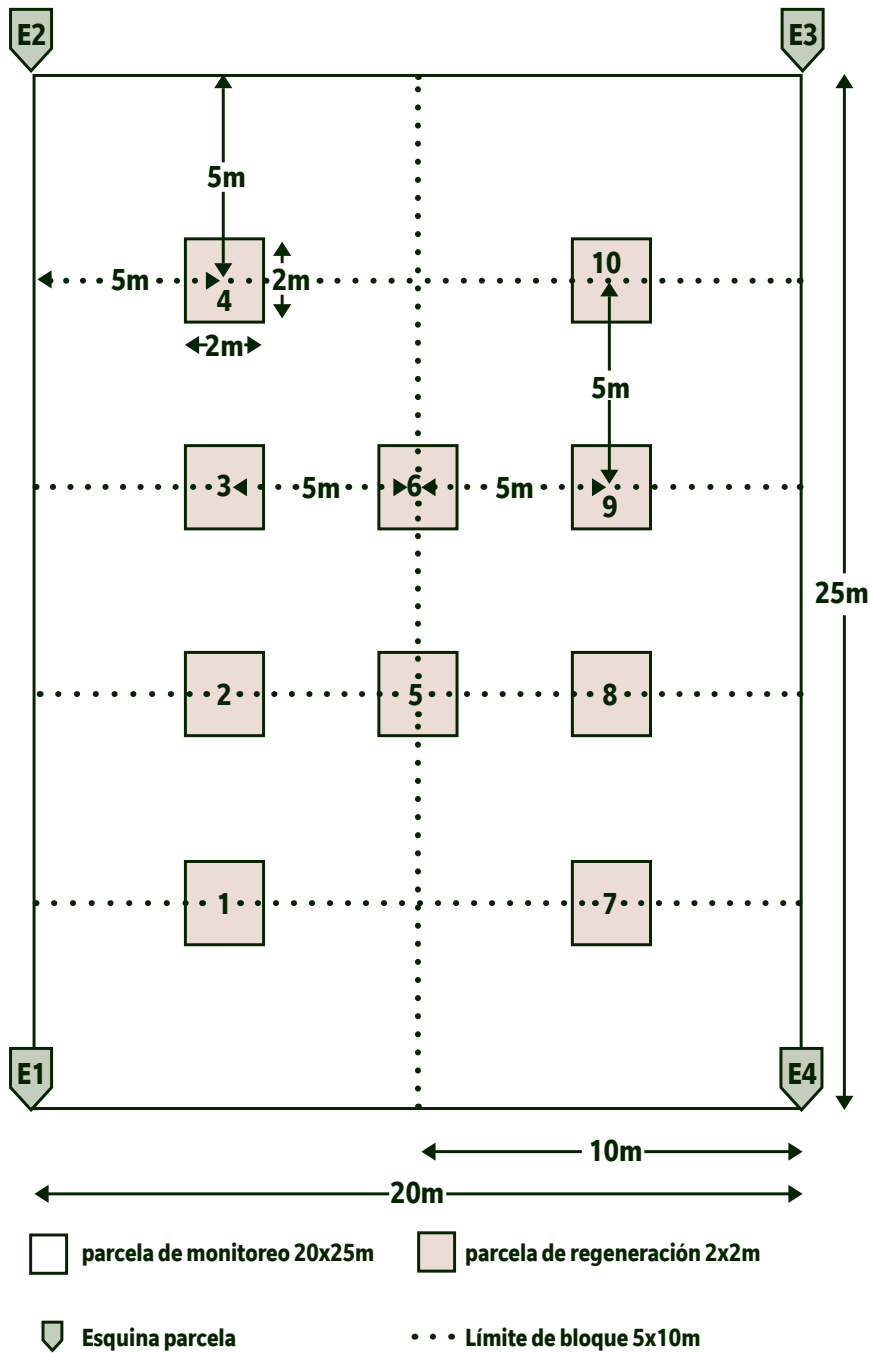


Figura 6: Ejemplo de parcela de muestro para levantar la línea base del área degradada. El número de parcela depende de la superficie a intervenir y de la variabilidad de las condiciones del sitio.

- **Definición de objetivos y metas**

Una vez caracterizado el ecosistema de referencia y el ecosistema degradado, se define el ecosistema objetivo del plan de restauración. De acuerdo con el estado actual del ecosistema degradado, el ecosistema objetivo puede ser un estado sucesionalmente más temprano que el ecosistema de referencia. No tiene necesariamente que ser un estado sucesional avanzado, pero sí un estado que vaya en la trayectoria deseada hacia el modelo de referencia que se ha definido. Por ejemplo, en el caso del bosque caducifolio de Concepción, un ecosistema objetivo puede ser un bosque secundario dominado por roble (*Nothofagus obliqua*) con presencia de especies semitolerantes en estado brinzal o en regeneración bajo dosel, que podría observarse al cabo de 10 años sin alteración antrópica.

El ecosistema objetivo se utilizar para luego definir las metas y objetivos del plan de restauración. Se sugiere ser realista y no plantearse metas y objetivos muy ambiciosos para esta etapa ya que hay que tener presente que pueden surgir o retornar amenazas y alterar la trayectoria de recuperación. En el caso de la restauración en ambientes invadidos por plantas exóticas, es necesario tener claro que este tipo de amenaza no es fácil de atender y una postergación o deficiente ejecución de actividades de mantención, pueden desviar la trayectoria y alejarse del cumplimiento de las metas y objetivos. Por otra parte, el tipo de propiedad del área de restauración es otro factor a tener en cuenta en la definición de metas y objetivos. Un área perteneciente a un solo propietario, a una comunidad indígena, un área pública o privada, entre otras, demanda diferentes estrategias para llevar el ecosistema a la trayectoria deseada.

- **Selección de aproximación de restauración ecológica**

Siempre es aconsejable que antes de implementar las acciones de restauración, se analice la capacidad de recuperación de cada especie presente en el lugar o de aquellas que se planea reintroducir frente a algún tipo de tratamiento. De igual forma, se sugiere revisar las barreras ecológicas y sociales que pueden afectar la efectividad de los tratamientos que se deseen implementar, de manera de hacer uso eficiente de los recursos económicos y humanos disponibles.

Existen tres tipos de aproximaciones de restauración ecológica: (i) regeneración natural, (ii) regeneración asistida y (iii) reconstrucción ecológica. Para seleccionar la aproximación más idónea para el sitio de restauración, se debe considerar principalmente el estado inicial del ecosistema degradado (cuán lejos se encuentra del ecosistema objetivo), el potencial de restauración del lugar (dado por las especies presentes capaces de recuperar el ecosistema), el tiempo y recursos financieros destinados para el plan. Según las condiciones del área de restauración, es posible que pueda aplicarse más de un tipo de restauración ecológica.

El plan debe señalar claramente las prescripciones técnicas asociadas a cada una de las aproximaciones a utilizar en el área de restauración. En algunos casos, el control de los factores exógenos limitantes como herbivoría por ganado puede inducir a la regeneración natural de plantas nativas en el sitio. Sin embargo, existen otras situaciones donde el potencial de recuperación es nulo o muy bajo, lo que implica usar estrategias de regeneración asistida, es decir, plantación de especies nativas. En aquellos casos donde ha ocurrido una destrucción completa del ecosistema original se debe reconstruir y recuperar los componentes bióticos y abióticos, detener la causa de degradación y eventualmente reintroducir especies identificadas en el modelo de referencia. Una instancia de reconstrucción ecológica es un área afectada incendio forestal o tala rasa y posterior de invasión de especies exóticas, sin presencia de un patrón de sucesión ecológica natural.

Regeneración natural: Aquí se controla la amenaza o agente de disturbio y el ecosistema se recupera sin mayor intervención. En este caso, el grado de alteración antrópica es bajo y aún existen poblaciones de plantas y animales nativas en el lugar o alrededores que pueden recuperarse por sí solos. La causa del daño puede ser solucionado mediante cercado, remoción de contaminantes o desechos de origen humano. En ocasiones, el cese del ramoneo de animales mayores mediante cercado perimetral del área a restaurar permite el rebrote y germinación de especies nativas. Aquí debe existir un potencial de restauración importante para optar por este tipo de aproximación de restauración ecológica.

Regeneración asistida: Aquí el grado de degradación es mayor que el caso anterior pero no extremo. Se requiere atender la causa de degradación e implementar acciones para recuperar atributos que han sido parcial o totalmente alterados. Ejemplos de acciones pueden ser: reforzar una población en declive y de baja diversidad genética, controlar la expansión de especies invasoras, instalar atributos estructurales específicos como perchas para rapaces, troncos caídos o árboles muertos en pie, recuperar el flujo de un río que ha sido alterado, mejorar la estructura del suelo, etc.

Reconstrucción: Esta aproximación se aplica cuando ha ocurrido una destrucción completa del ecosistema original y no existe un patrón de sucesión ecológica natural. Aquí se deben recuperar los componentes bióticos y abióticos, detener la causa de degradación y eventualmente reintroducir especies identificadas en el modelo de referencia. Un ejemplo de esto son grandes extensiones densamente ocupadas por especies exóticas invasoras como *Acacia dealbata* y *A. melanoxylon*, donde prácticamente no existen especies vegetales nativas y es necesario la reintroducción de especies nativas pioneras.

- **Control de aroma**

A partir de la experiencia desarrollada durante la ejecución del proyecto 036/2018 financiada por el Fondo de Investigación del Bosque Nativo de CONAF y además de las investigaciones realizadas por el Laboratorio de Ecología de Paisaje en el Parque Nonguén desde el 2011, se sugiere aplicar una reconstrucción ecológica y los siguientes tipos de mantención los cuales también pueden ser aplicados en cierta manera a otros ecosistemas similares. Las acciones propuestas más abajo corresponden a un ecosistema afectado por incendios de gran extensión en 1999, tala de árboles nativos e invasión de aroma. La densidad actual de aroma oscila entre 5.000 y 13.000 árboles por hectáreas, con alturas entre 10 y 17 m, y entre 5 y 20 cm de diámetro.

- **Habilitación mecánica**

Consiste en la remoción completa o roce de los árboles de aroma presentes en el área de restauración. De acuerdo con las condiciones topográficas, superficie y acceso al sitio de restauración, esta actividad se puede realizar de manera mecanizada con skidder o trineumático, o bien, mediante operadores de motosierra calificados. Para disminuir el impacto sobre el suelo, esta actividad debe realizarse durante el periodo estival. Posteriormente, una vez retirado los árboles de diámetro comercial y apilados fuera del área de restauración, se sugiere triturar los desechos vegetales que se generan durante la habilitación para promover la protección del suelo, la retención de agua y controlar la regeneración de especies exóticas por un periodo de tiempo.

- **Control manual de rebrotes**

Este control consiste en la eliminación manual con rozones y desbrozadoras en el caso de que el rebrote vegetal exótico se encuentra lignificado. Se sugiere aplicar el control de rebrotes manual de aroma pre-plantación a inicios de otoño. Post-plantación de especies nativas a mediados de primavera del primer año, se recomienda realizar un nuevo control del rebrote manual de *A. melanoxylon*.

El objetivo de esta actividad es disminuir la actividad fotosintética de la regeneración invasora presente en el sitio restaurado, liberando recursos abióticos y la competencia a las especies nativas plantadas o en regeneración natural.

Se debe contemplar en el presupuesto operacional a lo menos 5 años de control de especies exóticas, dado que al cabo de ese periodo las especies nativas establecidas ya tiene la estructura vertical y horizontal necesaria para inhibir el desarrollo de la especie invasora.

Es sumamente importante cumplir con los tiempos de aplicación y frecuencia en este tipo de control. Mientras más tiempo transcurre, el costo operacional de esta actividad de mantención se duplica o cuadruplica debido a la necesidad de cubrir jornadas de trabajo y actividades adicionales, tales como el acopio y retiro del producto vegetal y su posterior triturado.

- **Control químico de rebrotes**

En los casos en que el grado de invasión es alto y no existe presencia de flora y fauna nativa en el lugar invadido, se puede aplicar control químico estrictamente dirigido al follaje de especies invasoras y por personal certificado. Esta actividad debe ser aplicada a finales de la primavera o inicios de verano para un resultado eficiente y duradero. Si es bien aplicado este control podría eliminar toda la presencia de la especie invasora en una sola aplicación. Si bien las especies invasoras no son controladas a la primera aplicación, se recomienda repetir la actividad anualmente hasta disminuir sustancialmente su abundancia. Este control resulta ser el más económico, el más rápido y el más efectivo si es correctamente realizado. Si embargo, es necesario tener en cuenta las restricciones administrativas, regulatorias o política de manejo del sitio o predio antes de aplicar.

Se sugiere utilizar productos clase IV que no ofrecen peligro y de etiqueta verde, los cuales no son nocivos para los componentes bióticos y abióticos presente en el sitio de restauración. El principal producto químico es el Glifosato, y como componente activo Triclopyr comercialmente conocido Tricon, ambos productos en concentraciones bajas son altamente efectivos, no tóxicos y no producen efectos negativos en la flora y fauna nativa.

- **Control biológico de rebrotes**

Esta estrategia busca desarrollar un método de biocontrol operacional para aramo mediante la selección y aplicación de hongos lignocelulósicos (degradadores) en tocones de la especie exótica para evitar su multiplicación vegetativa y facilitar el establecimiento de la restauración ecológica.

El estudio y aplicación de este control debe ser guiada por un profesional experto en biodegradadores fúngicos. La primera actividad es la selección de los hongos nativos cercanos al área a restaurar para evaluar su potencial degradador en estudios de laboratorio, de esta manera se inoculan en trozos de madera de aramo y se determina cual es el potencial de degradación que tiene el hongo o los hongos.

Según estudios realizados en el marco del Proyecto FIBN 036/2018 de la Universidad de Concepción, el biodegradador fúngico *Trametes versicolor* posee alto potencial como control biológico de *A. melanoxylon*. Es un hongo saprófito a débilmente patógeno en árboles que tienen quebraduras por viento o heridas por diversa índole, sin riesgo para el ambiente por ser un hongo nativo del ecosistema y degradador natural de restos de madera como ramas, troncos y tocones. Al cortar mecánicamente al aramo, se puede inocular (incorporar a este hongo) al tocón de manera directa, el cual se va desarrollando en éste, generándole una pudrición progresiva en el tiempo. En la Figura 8 se grafica la acción de *T. versicolor* entre el año 2019 al año 2021 sobre un tocón de aramo inoculado.



Figura 7: Desarrollo y monitoreo de *T. versicolor* en un tocón inoculado de aromo en el Parque Nacional Nonguén. A) Formación de micelio blanquecino en el perímetro de tocón inoculado al mes 1 (mayo de 2019). B) Formación de fructificaciones de *T. versicolor* (mayo de 2020). C) Senescencia de fructificaciones de *T. versicolor* (mayo de 2021).

Sin embargo, este tratamiento biológico resulta más lento en controlar los rebrotes de aromo que las otras estrategias, debido al tiempo que toma el hongo para desarrollarse en el hospedero. Se debe esperar al menos un año para registrar fructificación en los tocones de aromo, dos años en ver disminución del número y altura de rebrotes de la especie y tres años en ver desprendimiento por pudrición de los rebrotes de la especie invasora (Figura 7).



Figura 8: Biocontrol de *T. versicolor* en tocones de aromo a tres años de la inoculación en el Parque Nacional Nonguén. A y B) Colonización de micelio en tocones y desprendimiento de rebrotes. C) Degradación y desprendimiento de brotes.

• **Diseño del patrón espacial de plantación**

El proceso o marco de trabajo para el diseño de la plantación sugiere una serie de actividades que en su conjunto definen el diseño espacial de la plantación (Figura 9). Este diseño se hace en base al patrón espacial horizontal de los individuos arbóreos presentes en los sitios del ecosistema referencia. Este patrón espacial o mapa de fustes corresponde a la localización georeferenciada de cada árbol nativo del dosel superior sobre 10 cm de diámetro y sobre 2 m de altura presente en una parcela de muestreo (Figura 10)

En el caso que se desee ocupar el bosque caducifolio de Concepción como ecosistema de referencia, está disponible una plantilla de plantación (Figura 11) la cual fue construida a partir de una parcela de una hectárea. Si se desea restaurar otro tipo de ecosistema, se sugiere caracterizar el ecosistema de referencia siguiendo el procedimiento descrito más adelante. En necesario tener presente que mientras más sitios de referencia sean caracterizados, de mejor forma se captura la variabilidad natural del modelo de referencia.

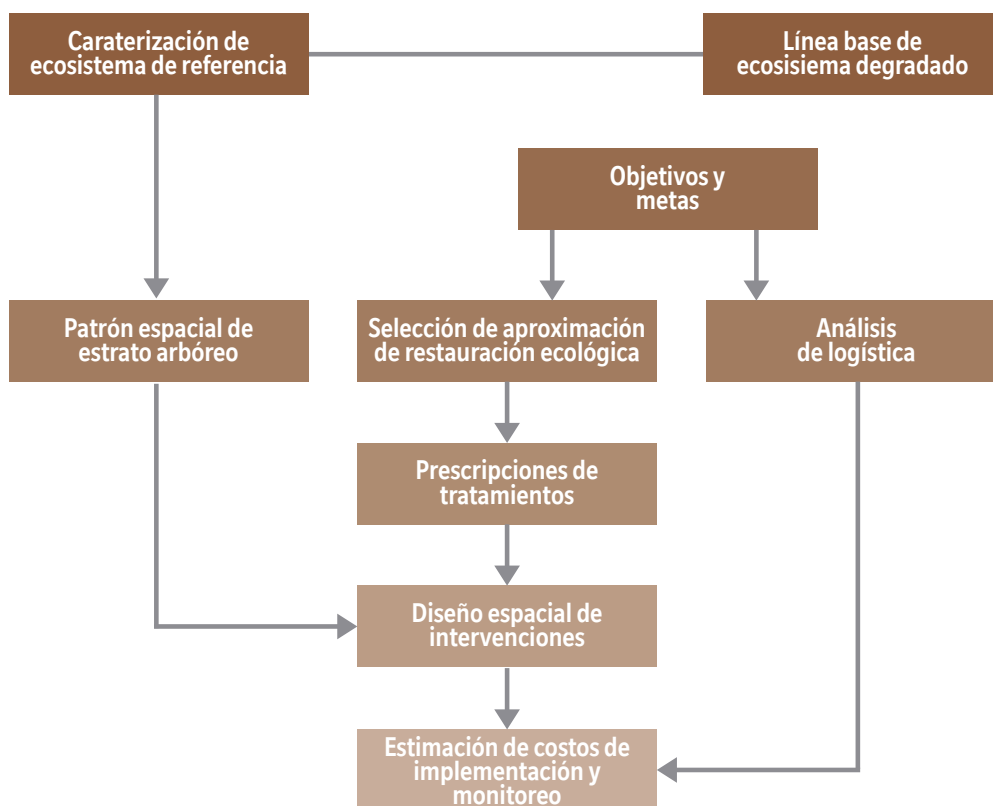


Figura 9: Marco de trabajo general de la etapa de diseño de un plan de restauración ecológica de bosques.

- **Área de influencia**

Mediante análisis estadísticos se analiza el patrón espacial de los individuos arbóreos del ecosistema de referencia para saber si éstos se agrupan o se distribuyen aleatoriamente. En caso de que los resultados estadísticos revelen que los árboles están agrupados, se determina la distancia a la cual forman grupos o cluster (*Figura 10*). Luego, a partir de esta distancia de agrupamiento, se genera un área de influencia alrededor de cada individuo en un sistema de información geográfica o a través de paquetes estadísticos. En el caso del ecosistema de referencia del Parque Nacional Nonguén, se usó un radio del área de influencia de 2,5 m (Moran, 2021).

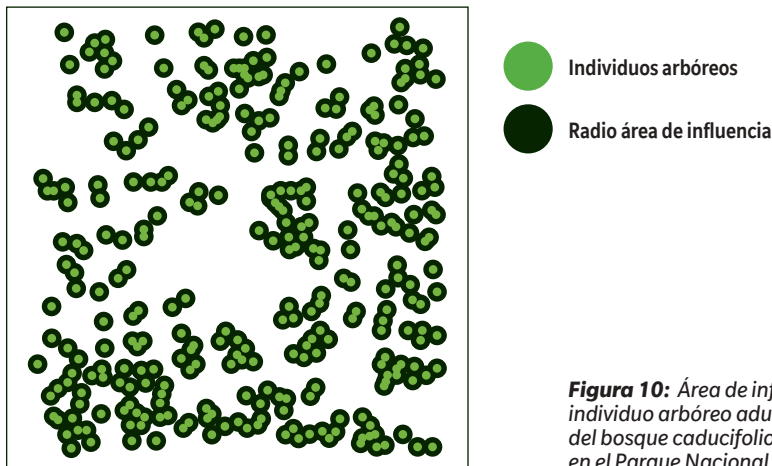


Figura 10: Área de influencia de cada individuo arbóreo adulto georeferenciado del bosque caducifolio de referencia en el Parque Nacional Nonguén.

- **Patrones espaciales de las especies arbóreas**

A partir del mapa de áreas de influencia se construye una plantilla, que contiene las figuras geométricas simples de diferentes dimensiones que representen los agrupamientos o cluster de árboles (*Figura 11*). Estas figuras pueden ser circunferencias, cuadrados, rectángulo y elipses y son las que luego serán proyectadas en el área de restauración. Luego, se calcula el número de plantas y especie a establecer por cada cluster de la plantilla de plantación.

La cantidad se estima a partir de la abundancia observada en el ecosistema de referencia (*Figura 10*) multiplicado por un factor de mortalidad esperada que puede ser de 40% a 60% según las condiciones biofísicas y ambientales propias del sitio. La densidad propuesta para la plantilla de plantación es de 2600 plantas por hectárea para la restauración de sitios afines con el ecosistema del Parque Nacional Nonguén. Información proveniente de otros sitios de referencia para el bosque caducifolio de *Nothofagus obliqua* indica que esta densidad puede llegar a 3800 plantas por hectárea.

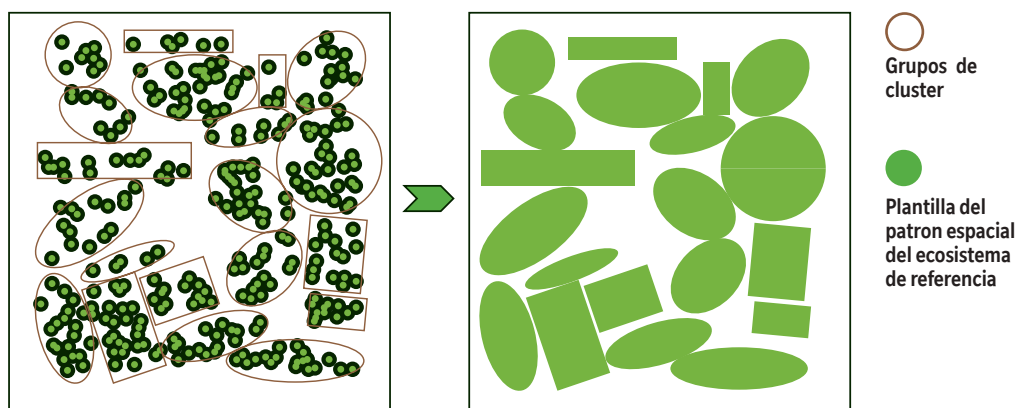


Figura 11: Patrón espacial de especies arbóreas (izquierda) del ecosistema de referencia descrito en el Parque Nacional Nonguén y plantilla del patrón espacial de plantación en grupos o cluster (derecha).

• Adquisición de plantas

Se recomienda iniciar las gestiones lo más pronto posible para la adquisición de las plantas a usar en la etapa de implementación. La disponibilidad de material vegetal en términos del número de plantas por especie, procedencia y estado de desarrollo de ellas suelen ser factores críticos para la ejecución de un plan de restauración ecológica. La reserva, compra y despacho de plantas debería al menos considerar:

- Época de cosecha de semillas.
- Variabilidad climática interanual que afecta la germinación y desarrollo de plantas.
- Tiempo requerido de cada especie para alcanzar el estado de desarrollo para su uso con fines de restauración ecológica.
- Procedencia del material vegetal utilizado en el vivero.
- Grado de variabilidad y estructuración genética de las especies, especialmente las amenazadas con distribución restringida y sometida a fragmentación de hábitat.
- Variación estacional a lo largo de gradientes longitudinales y latitudinales (inicio de temporada de lluvia, nieve y heladas define la temporada de plantación y, por ende, despacho desde viveros).
- Monitoreo del estado de desarrollo de las plantas en vivero desde la reserva hasta el antes del despacho.

Se recomienda realizar seguimiento periódicamente durante la primera temporada del proyecto de restauración. El encargado debe registrar e informar el crecimiento en altura y diámetro de cuello para cumplir con los estándares óptimos al momento de la plantación (Figura 12).

Es fundamental contemplar un programa de seguimiento de las plantas reservadas en los viveros para determinar la calidad de planta y si cumple con los estándares mínimos para ser establecida. Estos estándares generalmente son ejemplares de una temporada, 25 cm de altura y 3 mm de diámetro de cuello, esta forma se pretende asegurar el prendimiento de los individuos.



Figura 12: Características dasométricas de las plantas en vivero usadas para la restauración ecológica.

- **Diseño del programa de monitoreo**

El programa de monitoreo debe incluir la medición periódica de indicadores ecológicos y sociales del sitio de restauración. Se sugiere incluir indicadores ecológicos para los atributos clave listados en los Eestándares Internacionales de restauración ecológica. Además, incluir atributos socio-económicos en el monitoreo post-plantación de especies nativas. El programa de monitoreo permite generar la información necesaria para la posterior evaluación del grado de cumplimiento de las metas y objetivos. Se monitorea el progreso del plan en el tiempo, bajo un enfoque de manejo adaptativo y con recursos financieros asignados. Se sugiere realizar mediciones de las condiciones ecológicas y sociales pre-restauración y dejar un área testigo sin intervención para su comparación en el tiempo como una manera de evaluar el impacto.

Es muy importante realizar una carta gantt con los meses de monitoreo y con los indicadores ecológicos que se medirán en el periodo del proyecto. Es necesario tener en cuenta aquellos meses en los que no se podrán realizar mediciones por las condiciones adversas del clima en los sitios restaurados.

Se recomienda realizar un seguimiento mensual el primer periodo estival de la sobrevivencia, crecimiento de altura y diámetro de cuello de los individuos nativos establecidos mediante parcelas de monitoreo (Figura 13). Al segundo año realizar el monitoreo cada dos meses, y posterior a ese periodo se puede medir anualmente junto con el resto de los indicadores ecológicos y socio-económicos.

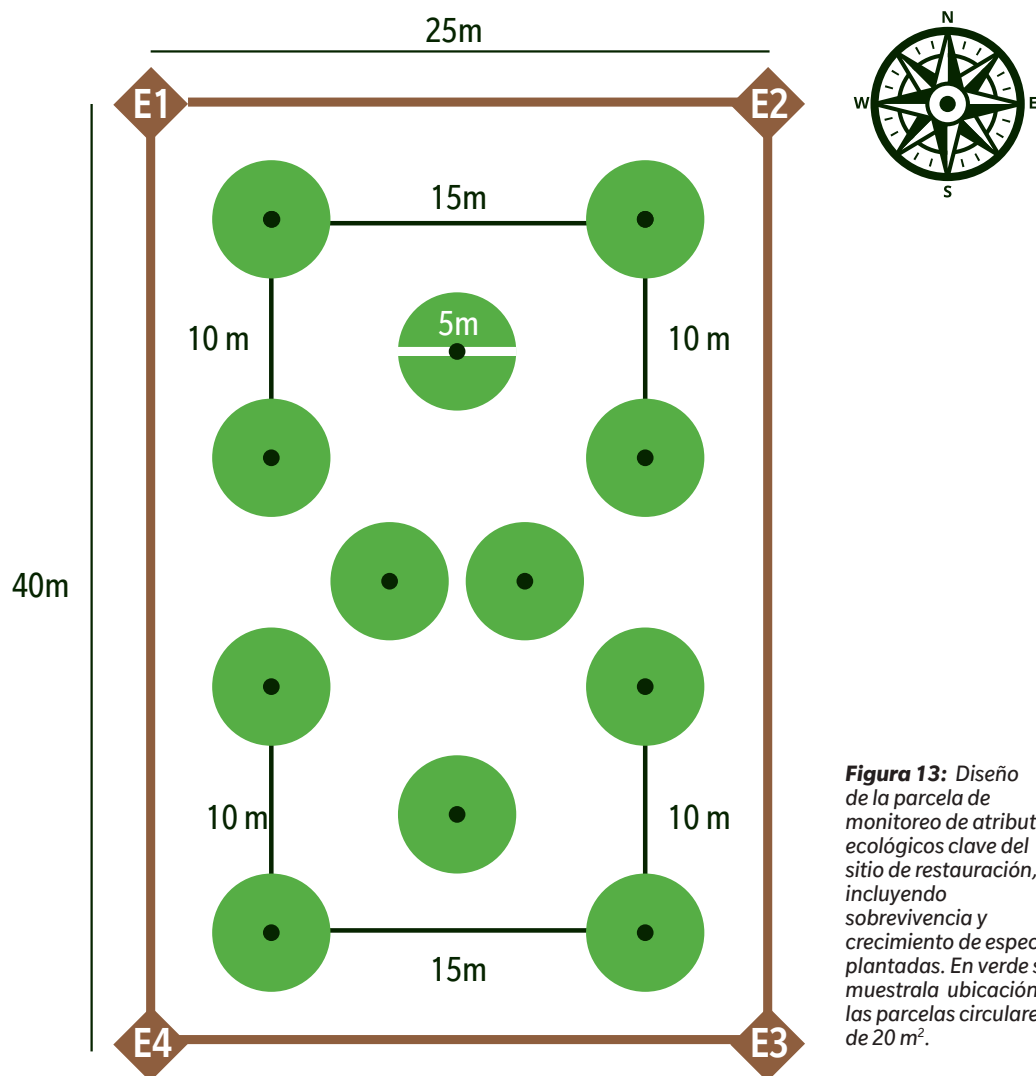
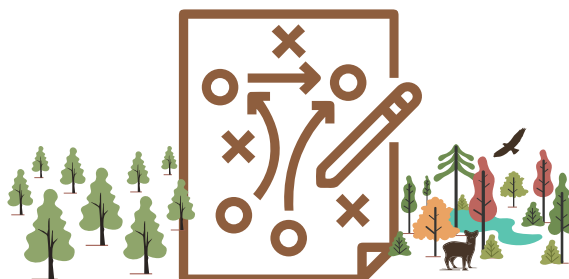


Figura 13: Diseño de la parcela de monitoreo de atributos ecológicos clave del sitio de restauración, incluyendo sobrevivencia y crecimiento de especies plantadas. En verde se muestra la ubicación de las parcelas circulares de 20 m².

Etapa 3: Planificación

Una vez diseñado el plan de restauración, en esta etapa se recomienda planificar oportuna y cuidadosamente las siguientes actividades con apoyo de una tabla Gantt:

- Habilitación de sitio para restauración durante periodo estival. Considerar las condiciones topográficas y superficie de restauración al momento de planificar. Se sugiere comenzar a fines de primavera y comienzo de verano para así asegurar ausencia de lluvias que afecten los caminos o vías de saca.
- Retiro de las plantas en viveros y coordinación con la fecha de plantación. Informar de esto al vivero para que inicie la selección y embalaje de plantas.
- Instalación de plantilla de plantación en el área de restauración.
- Plantación durante la estación otoño-invierno. En zonas con ocurrencia de nieve o heladas, se sugiere planificar la plantación para aquellos meses posterior a estos eventos, pero antes de un aumento de las temperaturas.
- Mediciones de los diferentes indicadores ecológicos del programa de monitoreo. Considerar que los indicadores tienen diferentes frecuencia y duración de medición. Para el primer monitoreo, se debe considerar la instalación de parcelas de monitoreo.
- Mantenimiento del rebrote de aromo considerando las estaciones de mayor crecimiento de la especie. Considerar que existen distintos tipos de control de rebrote con duración y frecuencia variable. En algunos casos la mantención puede incluir riego de las plantas.
- Evaluación del éxito de la restauración, puede ser anual o cada tres o cinco años según la disponibilidad de recursos. Esta actividad debe considerar información proveniente de monitoreo y por lo general coincide con informes de avance o final asociados a algún tipo de financiamiento o compromiso.
- Fecha de entrega de informes de avances o reportes a terceros.



Etapa 4: Implementación de las estrategias de control de aramo

Esta etapa del plan de restauración ecológica tiene como objetivo desarrollar las operaciones de habilitación del sitio de restauración, plantación de especies nativas y mantención de los rebrotes de aramo. Posterior a las actividades de control de la especie invasora, se procede con la instalación de la plantilla de plantación la cual contiene la distribución espacial de las plantas a establecer según el patrón espacial del ecosistema de referencia.

La coordinación técnica junto a la empresa colaboradora quien es encargada de realizar las operaciones forestales y el encargado del plan de restauración es fundamental para dar inicio a la etapa de la implementación. En este periodo es prioritario la constante comunicación de los avances y problemas que se vayan presentando en terreno en forma de reportes semanales para encontrar soluciones y adaptarse a los problemas presentados.

► Habilitación de sitio para restauración

- **Construcción y/o mejoramiento de accesos**

Los caminos deben estar preparados antes de empezar con las faenas mecanizadas. En el caso que se extienda hacia el otoño e invierno, se sugiere realizar acciones de mejoramiento de los caminos de acceso a las zonas de acopio y arrastres.

- **Construcción y/o mejoramiento de cercos**

Esta actividad debe estar lista antes de plantar, durante el otoño y después de terminar la habilitación del sitio. La mantención de cercos debe hacerse regularmente, en especial cuando existe la amenaza de animales mayores domésticos que pueden ramonear las plantas establecidas.

- **Habilitación mecánica o roce**

La principal acción de la etapa de implementación es la eliminación mecánica de especies exóticas presentes en el área a restaurar (*Figura 14*). Esta actividad generalmente se realiza con operadores de motosierra calificados por parte de la empresa colaboradora. En algunos casos cuando la vegetación nativa pueda ser dañada se realiza una traslocación de los individuos más jóvenes a otro sitio con mayor integridad ecológica cercana al área a restaurar.



Figura 14: (a) Condición pre-habilitación de sitio y (b) post habilitación de un sitio a restaurar

Durante la habilitación del sitio, se recomienda mantener la vegetación nativa presente en el lugar y los legados biológicos que se encuentren ya sea árboles nativos muertos en pie, quemados o rebrotando, puesto que estos ayudan a la recuperación del ecosistema natural del lugar (Figura 15).



Figura 15: Ejemplo de legados biológicos de importancia para la recuperación del ecosistema. Regeneración de especies nativas y árboles nativos remanentes.

- **Clasificación, acopio y retiro de productos forestales**

Generalmente la faena de cosecha es caracterizada como “semi mecanizada”, la cual está compuesta motosierristas, skidder para el arrastre de madera hacia las zonas de acopio y un trineumático para la clasificación de los productos forestales extraídos (Figura 16).



Figura 16: (a) Fotografía de arrastre de especies exóticas cosechadas con skidder, (b) Dimensionadas por motosierristas, (c) Clasificación y acopio por un trineumático, (d) Retiro de madera en camiones autocargantes en un sitio a restaurar.

Es de suma importancia conocer el rendimiento volumétrico de los productos forestales extraídos para poder determinar cuál es el valor de aprovechamiento económico de la madera que se obtendrá.

- **Triturado de los desechos forestales en el área a restaurar**

Una de las actividades más importantes posterior a realizar la cosecha y acopio de los productos forestales es el triturado de los desechos vegetales (Figura 17 y 18). Esta actividad promueve la protección del suelo, la retención de agua y controla la regeneración de especies exóticas por un periodo de tiempo. Se sugiere utilizar una máquina trituradora con una potencia de 600 hp, puesto que esta es altamente productiva realizando un avance de una hectárea por día, sin embargo, tiene un elevado valor de arriendo.



Figura 17: Máquina trituradora FTX 600 en preparación de sitio para la restauración.



Figura 18: (a) Trabajos de retroexcavadora para el retiro de material leñoso en exceso y (b) trabajo de retroexcavadora para la homogenización de altura del triturado.



Figura 19: (a) Sitio de restauración habilitado y (b) el mismo sitio con una capa de astillas resultante del triturado de aromo.

► Plantación de especies nativas

• Instalación de plantilla de plantación en el sitio de restauración

Una vez que el sitio de restauración se encuentra cubierto de manera homogénea con una capa de astillas del triturado de aromo, se procede a la instalación de la plantilla de plantación. Para ello, se requiere de personal capacitado de cuatro profesionales, en el cual el encargado del equipo instala una banderola o tubo de PVC con el identificador de la figura en el centro de cada cluster del diseño de la plantación (Figura 20). el equipo debe ir completando con banderolas en todo el perímetro de cada cluster o figura (Figura 21). Para esta actividad se requiere de un mapa georreferenciado de alta precisión, brújula, distanciómetro, banderolas, plumón y huincha de 100 m.



Figura 20: (a) Instalación de un centro de cluster de PVC y placa metálica con identificador de la figura, (b) instalación centro de cluster con una banderola u otro objeto que denote un centro de figura.

En esta actividad es sumamente importante evaluar previamente si es factible instalar la plantilla completa en el área de restauración, ya que la topografía del terreno, legados biológicos, presencia de elementos naturales (ríos y rocas) y los desechos forestales pueden reducir los espacios disponibles para la plantación. Si este es el caso, se sugiere acomodar o dividir la plantilla pero manteniendo su orientación original (Figura 22).



Figura 21: (a). Delimitación de diagonales con distanciómetro y banderolas, (b) Marcaje de clústers en terreno mediante el uso de banderolas.

En algunas ocasiones suele ser útil el marcaje de cluster mediante pintacal para facilitar la distribución de las plantas (Figura 22b). Sin embargo, se debe tener en cuenta que la humedad del sitio puede remover este marcaje. De todas maneras, esta aproximación es efectiva para que el plantador reconozca los límites del cluster al momento de la plantación.



Figura 22: (a) Patrón espacial de ecosistema de referencia. Puntos indican presencia de árboles de diversas especies. Las figuras verdes son los cluster que derivan de una hectárea del patrón espacial del ecosistema de referencia. (b) Fotografía aérea de la instalación de cluster en terreno mediante la utilización de pintacal.

- **Control de despacho y traslado de plantas al sitio de restauración**

En esta actividad el encargado del proyecto debe coordinar con anticipación el número de plantas que se requiere, generalmente se empaquetan sacos de 50 o 100 plantas (*Figura 23*). Cuando la superficie del sitio y el número de plantas es muy alto es recomendable realizar retiros paulatinos para que las plantas no queden en sacos mucho tiempo y se comprometa su sobrevivencia.



Figura 23: Plantas preparadas para despacho desde los viveros.

- **Conteo de plantas y tratamiento de enraizamiento y baño de hidrogel**

En esta actividad se dispone de una zona de trabajo para el conteo de plantas, el tratamiento de fertilización y baño de hidrogel a las plantas nativas previo a ser agrupadas por cluster y plantadas en el sitio (*Figura 24*). Esta acción se realiza con un trabajo en conjunto de la empresa colaboradora y el equipo de restauración. Esta actividad debe ser realizada por la empresa contratista y supervisada por el encargado y su equipo de restauración. Se recomienda tener identificado un curso de agua cercano para el abastecimiento continuo de agua para la mezcla de enraizante e hidrogel para tratar las plantas y poder ser empaquetadas en sacos para su posterior traslado al centro de cada cluster.



Figura 24: Baño de las plantas en hidrogel.

- **Distribución de las plantas en el sitio de restauración**

Una vez dispuestas las plantas con su tratamiento pre-plantación se prepara para realizar el movimiento de los sacos de plantas hacia los cluster, se realiza la distribución por especie de todos los individuos nativos. El encargado y su equipo deben registrar el estado y número de plantas con el apoyo de la empresa colaboradora (Figura 25).

Es importante registrar la cuenta por especie para que todos los cluster mantengan la proporción de plantas correctas respecto al diseño espacial de referencia. Además, es necesario registrar individuos en mal estado e informar al vivero correspondiente.



Figura 25: Distribución de plantas a los centros de los cluster.

- **Confección de casillas, fertilización y plantación de especies nativas**

En algunos sitios en donde el material triturado es más profundo es necesario realizar un trabajo previo alcanzar el suelo y poder realizar una casilla para luego establecer las especies nativas del sitio. Con los sacos distribuidos en sus respectivos centros de cluster, se les reparte a los plantadores el fertilizante y su equipo de plantación. La distribución de las plantas la dirige el encargado y su equipo, quienes deben supervisar la correcta técnica de establecimiento de los ejemplares. Se requiere de un buen cultivo del suelo antes de plantar, 20 gr de basacote (fertilizante) dirigido en un agujero a favor de la pendiente frente la planta, pisar por alrededor de la planta establecida para sacar exceso de aire y por último disponer sobre la planta mulch o triturado (Figura 26).



Figura 26: Plantación de especies nativas en el Parque Nacional Nonguén.

► **Mantenimiento de rebrotes de aramo**

A continuación se presentan tres estrategias de control de rebrote de aramo para una condición inicial de degradación posterior a la plantación de especies nativas (Figura 28, 30 y 33).

- **Control manual de rebrotes de aramo**

Mediante herramientas manuales se debe eliminar el 100% de la cobertura vegetal de la especie exótica antes y después de la plantación de especies nativas. Los desechos vegetales ligeros producto de esta actividad pueden ser una gran oportunidad para incorporar materia orgánica al suelo (Figura 27).



Figura 27: Control manual de rebrotes de aromo antes y después a la plantación de especies nativas.

Estrategia 1

Control mecánico - manual



Costo



Efectividad



Verano



Otoño



Invierno



Primavera

IMPLEMENTACIÓN

MANTENCIÓN

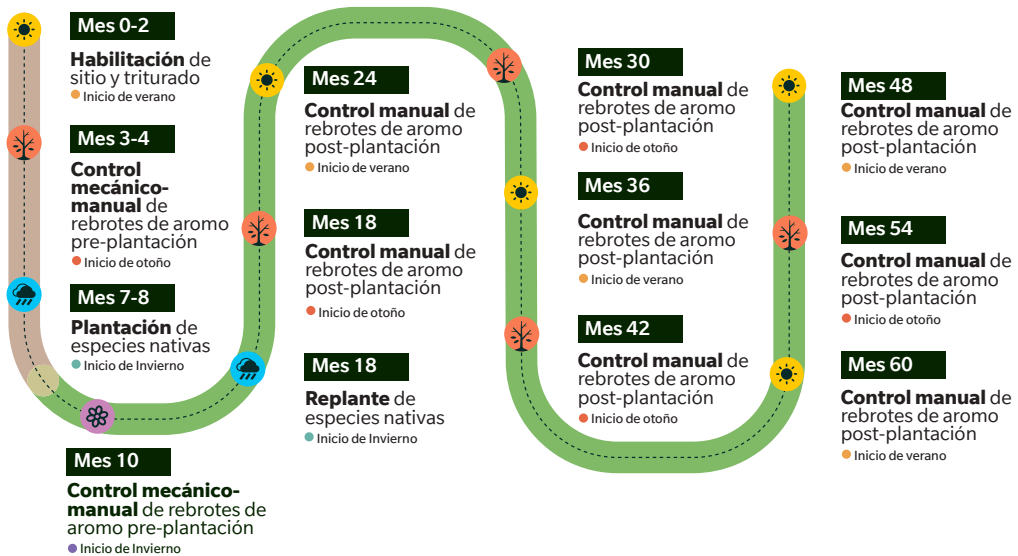


Figura 28: Esquema de implementación y mantención de la estrategia de control mecánico-manual.

• **Control químico de rebrotes de aromo**

En la temporada de mayo pre-plantación y en primavera post-plantación se recomienda realizar esta actividad. La mezcla utilizada contiene 3 kg/ha de Glifosato de compuesto activo al 60%, 1/2 Litro/ha de Triclopir y 30 gr/ha de Aliado cada cien litros de agua dependiendo del nivel de invasión (Figura 29). Su aplicación es con equipo de fumigación agrícola directamente a la vegetación exótica 15 a 30 días antes de la plantación. Se debe proteger la vegetación nativa del sitio de restauración.



Figura 29: Control químico de rebrotes de aromo antes y después a la plantación de especies nativas.

Estrategia 2

Control mecánico - químico



Costo



Efectividad



IMPLEMENTACIÓN

MANTENCIÓN



Figura 30: Esquema de implementación y mantención de la estrategia de control mecánico-químico.

- **Control biológico de rebrotes de aromo**

Posterior a la corta de los tocones e inoculación con *T. versicolor*, es importante considerar que esta labor se realice en temporada primaveral en tocones cortados de no más de un mes y sin presencia de rebrotes previos (tocones cortados de meses) haciéndoles un corte en cruz donde se incorporará el inóculo. A estos, se les debe aplicar 20 gramos aproximados del material biológico (trigo inoculado) en los tocones de aromo que se encuentran en el sitio de restauración. Los gramos de inóculo por tocón son variables, cantidad que dependerá del diámetro de cada tocón, inoculando diámetros entre 5 a 20 cm (Figura 31).



Figura 31: Proceso de aplicación de control biológico en campo. a) Corte en cruz sobre tocón de aromo. b) Inoculación de tocón con *T. versicolor* desarrollado en trigo.

El monitoreo y efecto del biocontrol en los rebrotes, se observan al año de aplicado y en adelante, sobre tocones aplicados en las zonas restauradas con especies nativas. Las variables a evaluar son efecto de control son la reducción de tamaño de rebrotes, ausencia de rebrotes, mortalidad de rebrotes (Figura 32). Cabe destacar que el biocontrol es de una aplicación por vez única, alcanzado mortalidad sobre el 60% y reduciendo la altura de rebrotes en los tocones no muertos, siendo un efecto a un ritmo ecológico en el ecosistema.



Figura 32: Monitoreo y efecto del control biológico con *T. versicolor* en tocones de aramo inoculados durante dos años en Valdivia, Fundo Teja Norte. A) Reducción de altura de rebrotes en tocones inoculados. B) Mortalidad y ausencia de rebrotes de aramo (flechas rojas indican tocones muertos). C) Mortalidad de rebrotes de aramo.

Estrategia 3

Control mecánico - biológico



IMPLEMENTACIÓN

Costo



Efectividad



Figura 33: Esquema de implementación y mantención de la estrategia de control mecánico-biológico.

- **Replante de especies nativas**

- La actividad de replante contempla el establecimiento y fertilización de plantas nativas que suplan con la mortalidad de la temporada estival posterior a la plantación.
- Se recomienda reservar las plantas con anticipación con los viveros para asegurar disponibilidad.
- De igual forma, se sugiere detectar amenazas o factores abióticos que explican la mortalidad de las plantas para que sean atendidos antes del replante.
- Es importante realizar una evaluación de los monitoreos de sobrevivencia y determinar el porcentaje de individuos a replantar para cumplir con la densidad inicial establecida en el proyecto de restauración.

► Rendimientos diarios y costos por hectárea de las actividades de la implementación y mantención

Llevar a cabo un plan de restauración necesita un gran esfuerzo técnico y económico por lo que recabar información de los costos de estas actividades se torna un desafío y un avance significativo para la ejecución de futuros proyectos de restauración a diferentes escalas dentro de un territorio.

Debido a la notoria especialización de los servicios requeridos para llevar a cabo la restauración, se hace difícil encontrar un número significativo de oferentes de los distintos servicios que requiere cada etapa de la restauración de un bosque natural. Por esta razón se consideró el método de recolección de información a través de expertos e informantes clave. Para seleccionar los entrevistados se consideró a los encargados de la empresa contratista y profesionales cuya actividad fuera desarrollar algún servicio identificado como necesario para la restauración del ensayo. En dichas entrevistas se les consultó a cada agente respecto a los costos incurridos y las fuentes de variación más relevantes. A continuación, se presenta una tabla de la sistematización de actividades y costos, clasificados según las etapas de restauración ecológica ejecutadas en el presente estudio (*Tabla 1*).

Tabla 1: Descripción de actividades y costos por etapa de la implementación de un plan de restauración ecológica.

Etapa	Descripción	Rendimiento	Costo/ha*	Consideraciones
Implementación	Adquisición de plantas 3000/ha	NA	\$2.400.000	Variación de densidad según ecosistema de referencia
	Habilitación mecánica o roce	65 - 80 m3/día	\$2.286.000	Tres motosierristas - variación del rendimiento en sitios con pendientes
	Madereo con skidder	100 m3/día	\$2.454.000	Variación del rendimiento en sitios con pendientes
	Trozado en cancha de acopio	65 m3/día	\$1.249.200	Dos motosierristas
	Acopio de productos forestales	150 m3/día	\$3.967.696	Dos trineumático
	Retiro de madera	300 m3/día	\$1.100.000	Dos camiones autocargantes
	Triturado y mantillo de mulch	400 m3/día	\$2.203.241	Maquina FX 600 – pendiente menor a 5 %
	Instalación de clúster	15 a 20 clúster/día	\$650.000	Costos profesionales e insumos
	Plantación y fertilización de 3000 plantas por ha	1.200 ind/día	\$1.139.888	Cuatro plantadores certificados
Mantenión	Control químico de rebrotes de aroma	1.5 ha/día	\$512.364	Cuatro trabajadores certificados
	Control manual de rebrotes de aroma	1 ha/día	\$1.792.978	Cuatro trabajadores certificados
	Control biológico de rebrotes de aroma	500 tocones/día	\$ 360.000	Profesional a cargo y dos asistentes
	Replante de especies nativas 1.500/ha	1.200 ind/día	\$683.933	Cuatro plantadores certificados

*Valores en pesos chilenos al año 2022. UF = \$33.504. 9-ago-22.

Etapa 5: Monitoreo

Una vez terminada la implementación de las acciones de restauración, se da inicio inmediato de un programa de monitoreo, el cual permite generar la información necesaria para evaluar el grado de cumplimiento de las metas y objetivos del plan. Los profesionales a cargo del plan deben tener presente que el monitoreo es esencial para determinar el éxito de la restauración ecológica y el momento en que el ecosistema es autosustentable y no requiere una mayor asistencia. Así también, el programa de monitoreo provee información útil para el aprendizaje de las acciones que se realizan y los ajustes que se requieran. El monitoreo debe contar con un sistema de almacenamiento y respaldo de los datos que se reúnen durante las mediciones. El registro de la información digital debe seguir protocolos de estandarización de datos y pasar por procesos de depuración interna antes de ser almacenada.

Durante el monitoreo se miden los indicadores ecológicos y sociales que se hayan seleccionado durante la etapa de diseño del plan. Los métodos de muestreo a emplear deben ser simples y fáciles de usar, de tal manera de optimizar los recursos financieros y humanos. Para el caso de indicadores ecológicos, se recomienda la instalación de parcelas de muestreo. Las dimensiones y forma de las parcelas que se pueden emplear son diversas, siendo las más comunes las de 500 m² rectangulares para restauración de bosques, especialmente cuando se busca un seguimiento permanente de ciertas variables (por ejemplo, tasa de crecimiento a nivel de árbol individual). Las parcelas también pueden ser usadas para medir variables que representen la situación general, como tasa de sobrevivencia y riqueza total de especies, entre otras. En el caso de plantación de especies nativas, además de los indicadores mencionados en la etapa de diseño del programa de monitoreo, se sugiere medir regularmente la sobrevivencia y crecimiento de las especies plantadas durante el periodo de monitoreo. En cuanto a los indicadores sociales, se sugiere usar encuestas, entrevistas o talleres con los actores involucrados. Es importante apoyarse con especialistas del área social como antropólogos o sociólogos ambientales. ver atributos e indicadores sociales en los Principios y Estándares Internacional de la Sociedad de Restauración Ecológica (Gann et al. 2019).

En el programa de monitoreo se debe definir previamente el tamaño de las parcelas de monitoreo y los indicadores ecológicos se medirán en el tiempo. Se sugiere medir los atributos clave definidos por la SER (ver tabla de Figura 5) mediante indicadores de:

- Amenazas o factores de degradación,
- Condición físicas y químicas del suelo,
- Composición de especies,
- Diversidad estructural,
- Función ecosistémicos e
- Intercambios o flujos externos.

La sobrevivencia, la altura y diámetro de cuello son indicadores básicos que se recomienda medir mensualmente durante un año (Figura 34), y luego monitorear semestral o anualmente. En el caso de las variables de crecimiento, se sugiere realizar un seguimiento individual de un cierto número de plantas establecidas e identificadas con una etiqueta numerada en una parcela de monitoreo.



Figura 34: Monitoreo de variables ecológicas

En cuanto a indicadores sociales, se sugiere incluir:

- Involucramiento de actores,
- Bienestar humano,
- Enriquecimiento del conocimiento,
- Capital natural,
- Distribución de beneficios, entre otros.

Etapa 6: Evaluación

Esta etapa busca evaluar el progreso de un ecosistema a lo largo de la trayectoria de recuperación. Se usan los resultados del monitoreo para evaluar y documentar la efectividad de los tratamientos cada cierto periodo de tiempo y hacer ajustes en caso que sea necesario. La evaluación aplica un marco conceptual basado en la interpretación de información cuantitativa reunida a partir de los indicadores de monitoreo respecto a un modelo de referencia.

La evaluación consiste en la elaboración de un documento o informe el cual contiene el programa de monitoreo, los resultados de las mediciones y la evaluación de éxito. El documento debe contener cierto grado de formalidad y estandarización para su comparación a través del tiempo. Los resultados de evaluación deben ser vistos desde un enfoque de manejo adaptativo, es decir, desde una mirada sistemática de lecciones para el aprendizaje y así mejorar los tratamientos o aproximaciones aplicadas.

Se recomienda proporcionar pruebas o evidencias para que las partes interesadas perciban los cambios ocurridos en el ecosistema. Una secuencia temporal de fotografías de un mismo lugar, antes y después de las intervenciones, es muy útil para proveer evidencia de los impactos ecológicos de la restauración y que las metas y objetivos se están cumpliendo. Estas evidencias pueden generarse a diferentes escalas temporales y espaciales. Para evaluar la recuperación ecológica, se sugiere utilizar herramientas estadísticas o esquemas que permitan visualizar el grado de recuperación de un ecosistema a través del tiempo. Los Estándares sugieren utilizar la rueda de la recuperación ecológica a una escala de cinco estrellas, en la cual las respuestas a los tratamientos son evaluadas en cinco diferentes niveles con respecto a un ecosistema de referencia (*Figura 35a*). Un valor bajo podría significar que los sustratos están remediados, existe una cierta colonización de especies nativas y existe potencial para un intercambio de especies y genes con el entorno. En cambio, valores altos podrían significar que existe una evidente recuperación de procesos naturales alineados con el ecosistema de referencia, y que la complejidad y patrón espacial permiten la autoorganización.

La evaluación de los indicadores debe ser comparativa con la condición pre-restaurado y post-restaurado. De esta manera se logra visualizar la recuperación de los atributos ecológicos de los ecosistemas, su trayectoria sucesional de autorecuperación e impactos socio-económicos. El uso de infografía es una buena forma de visualizar los cambios e impactos sociales y ecológicos de los ecosistemas restaurados (*Figura 35b*).



Figura35a: Ejemplos de rueda de recuperación ecológica

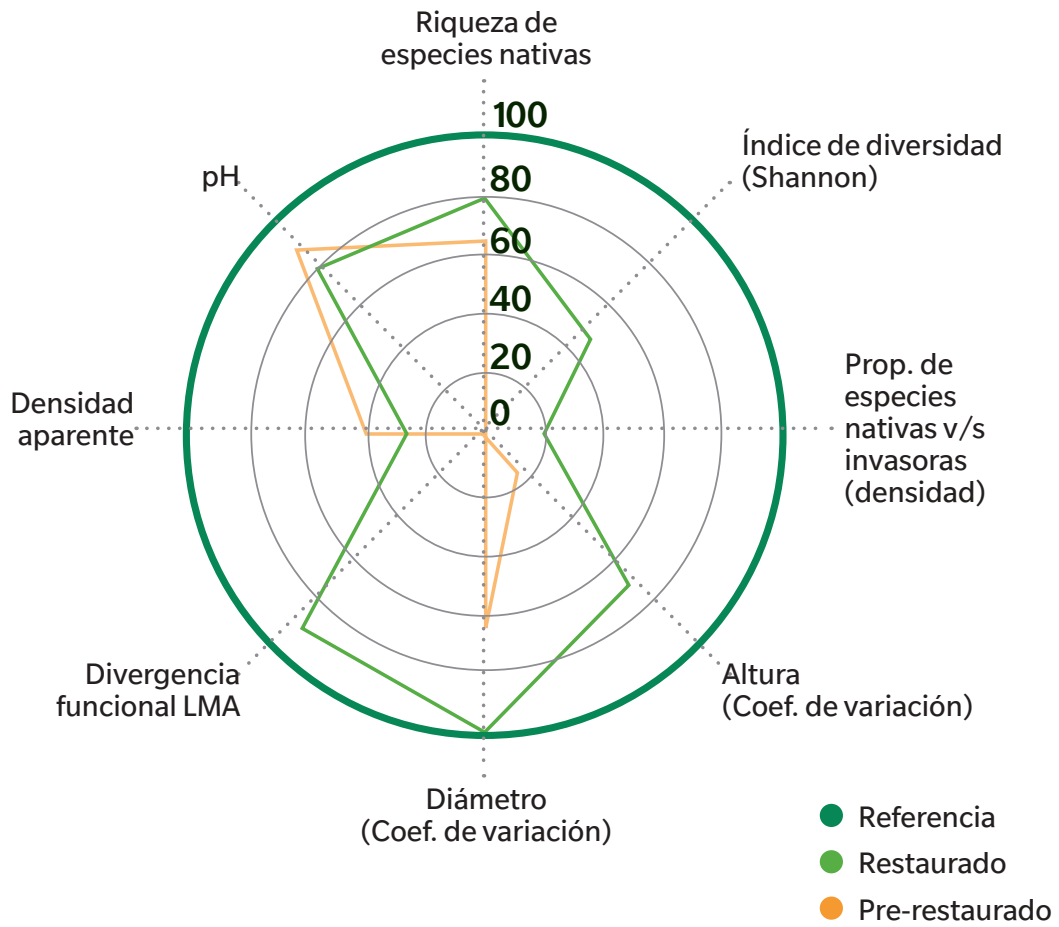


Figura 35b: Evaluación integrada de la restauración ecológica mediante indicadores ecológicos medidos en las diferentes condiciones de sitio.



Figura 36: Ensayo de restauración ecológica de dos años de plantación y sometida a mantención manual. Parque Nacional Nonguén.

REFERENCIAS

- Clewell, A., y Aronson, J. (2013). *Ecological restoration: principles, values and structure of an emerging profession* (Second Edition ed.). Island Press.
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E. S., Ngo, H. T., Agard, J., Arneeth, A., Balvanera, P., Brauman, K. A., Butchart, S. H. M., Chan, K. M. A., Garibaldi, L. A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S. M., Midgley, G. F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., Zayas, C. N. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366(6471), eaax3100. <https://doi.org/10.1126/science.aax3100>
- Echeverría, C., Gatica-Saavedra, P., Roman, S., Bordeu, A., y Espinoza, C. (2021). Mas allá de la deforestación: restauración ecológica de bosques nativos en el Parque Nacional Nonguén, Chile.
- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua Fangyuan, Echeverría, C., Gonzales Emily, Shaw Nancy, DeClerk Kris, y Dixon, K. W. (2019). *International principles and standards for the practice of ecological restoration*. *Restoration Ecology*, 27, S1-S46.
- Herrera, I., Goncalves, E., Pauchard, A., y Bustamante, R. O. (2016). *Manual de plantas invasoras de Sudamérica*. IEB Chile, Instituto de Ecología y Biodiversidad Región de O'Higgins, Chile.
- Moran, J. (2021). *Diseño de plantación de especies arbóreas nativas en un área de restauración ecológica en el Parque Nacional Nonguén*. *Habilitación profesional, Ingeniería en Conservación de Recursos Naturales, Universidad de Concepción, Concepción*. 59 p.
- Pauchard, A., y Shea, K. (2006). Integrating the study of non-native plant invasions across spatial scales. *Biological invasions*, 8(3), 399-413.
- Quiroz, C., Pauchard, A., Marticorena, A., y Cavieres, L. (2009). *Manual de plantas invasoras del centro-sur de Chile*. Laboratorio de Invasiones Biológicas Concepción.
- Ruiz, G. M., y Carlton, J. T. (2003). Invasion vectors: a conceptual framework for management. *Invasive species: vectors and management strategies*, 459-504.
- Vilà, M., Basnou, C., Pyšek, P., Josefsson, M., Genovesi, P., Gollasch, S., Nentwig, W., Olein, S., Roques, A., y Roy, D. (2010). How well do we understand the impacts of alien species on ecosystem services? A pan-European, cross-taxa assessment. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(3), 135-144.



MANUAL DE
RESTAURACIÓN
ECOLÓGICA DE
**BOSQUES
NATIVOS
INVADIDOS
POR AROMO**

(*Acacia melanoxylon* R. Br.)
EN LA REGIÓN DE BIOBÍO

CRISTIAN ECHEVERRIA LEAL
ESTEBAN BUSTAMANTE ROMERO
RODRIGO MORALES RAMIREZ



Universidad de Concepción



Laboratorio
De Ecología
De Paisaje



Fondo de
Investigación
del Bosque Nativo

