



El Colegio de la Frontera Sur Université de Sherbrooke

La reubicación controlada como estrategia de conservación de
especies forestales en los bosques templados de América del
Norte (México, Estados Unidos y Canadá)

TESINA

presentada como requisito parcial para optar al grado de
Maestría Profesionalizante en Ecología Internacional

por

Rosela Narváez Pérez

2015

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado para realizar mis estudios de maestría, así como al gobierno canadiense por haberme beneficiado a través del programa de futuros líderes en las Américas.

De igual forma, agradezco a todos los profesores y coordinadores de la maestría profesionalizante en Ecología Internacional presentes en El Colegio de la Frontera Sur y en la Université de Sherbrooke. Un especial agradecimiento a mi tutora, la Dra. Mirna Valdez Hernández por su tiempo, ayuda y comentarios que me permitieron desarrollar el presente documento y al Dr. Bernardus H.J.de Jong por sus comentarios. A la Dra. Morgane Urli, porque gracias al tiempo que pasamos juntas durante mi estancia en Canadá, surgió la idea de este ensayo.

Quiero agradecer también a mi familia, especialmente a mis padres, Genaro y Noemí, y a mis hermanas, Ingrid y Nohemy, quienes con su apoyo fueron un sostén muy importante para mí a lo largo de estos dos años, porque tuvieron la paciencia para escucharme y estar siempre ahí cuando los necesitaba.

Por último, quiero agradecer a mis queridas amigas y a todas las personas increíbles que tuve la fortuna de conocer tanto en México como en Canadá y que hicieron de esta experiencia una gran aventura tanto académica como personalmente.

Resumen

El cambio climático es una de las grandes amenazas a la que deberán enfrentarse las especies, aunque actualmente ya es posible observar cómo les está afectando y está previsto que su impacto será más intenso en el futuro próximo. Ante este pronóstico, se han planteado diferentes estrategias para evitar la pérdida de especies así como los servicios ecosistémicos que éstas proporcionan. La reubicación controlada, también conocida bajo el nombre de migración asistida, es una estrategia de conservación que consiste en el movimiento de especies, poblaciones o genotipos hacia lugares fuera de su distribución histórica con la finalidad de mantener la diversidad biológica y el funcionamiento de los ecosistemas ante el escenario del cambio climático. En los bosques templados de América del Norte la reubicación controlada representa una estrategia de adaptación viable, sobre todo por la importancia que estos ecosistemas forestales tienen en esta región. Sin embargo, su aplicación genera una gran controversia sobre todo por los riesgos potenciales que su implementación conlleva, siendo el principal que la especie reubicada se vuelva invasora en el ecosistema al cual sea trasladada y en consecuencia altere las comunidades bióticas ya establecidas. El debate en torno a su aplicación ha acaparado la atención no sólo del ámbito científico, sino también de los organismos gubernamentales y los gestores de recursos naturales. Las iniciativas adoptadas en relación a la reubicación controlada de especies forestales en América del Norte ofrecen un gran potencial para su implementación a mayor escala en esta región, aunque su aplicación dependerá del contexto específico de cada especie.

Palabras clave: Reubicación controlada, migración asistida, bosques templados, América del Norte, cambio climático.

Sommaire

Le changement climatique est une des grandes menaces auxquelles devront faire face les espèces. En effet, il est déjà possible d'observer comment ce phénomène les affecte, et il est aussi prévu que son impact sera plus intense dans un futur proche. Actuellement, il y a plusieurs stratégies qui ont été suggérées afin d'éviter la perte d'espèces et les services écosystémiques qu'elles offrent. La relocalisation gérée, aussi connue sous le nom de migration assistée, est une stratégie de conservation qui consiste à déplacer des espèces, des populations ou des génotypes à l'extérieur de leur aire de distribution historique, comme objectif de maintenir la diversité biologique et le fonctionnement des écosystèmes face au scénario de changement climatique. Dans les forêts tempérées d'Amérique du Nord, la relocalisation gérée représente une stratégie d'adaptation faisable, majoritairement en raison de l'importance que ces écosystèmes forestiers possèdent dans cette région. Néanmoins, sa mise en place est synonyme de grande controverse principalement pour les risques potentiels qu'elle implique, le principal risque étant que l'espèce relocalisée devienne envahissante dans l'écosystème où elle est déplacée. Elle pourrait ainsi altérer les communautés biotiques déjà établies. Le débat qui entoure son implantation a attiré l'attention non seulement des scientifiques mais aussi des organismes gouvernementaux et des gestionnaires des ressources naturelles. Les initiatives déjà appliquées par rapport à la relocalisation gérée des espèces forestières en Amérique du Nord offrent un grand potentiel pour son implantation à grande échelle dans cette région, bien que son utilisation dépende du contexte spécifique de chaque espèce.

Mots clé: Relocalisation gérée, migration assistée, forêt tempérée, Amérique du Nord, changement climatique.

Índice

Agradecimientos	I
Resumen	II
Sommaire	III
Índice	IV
Lista de cuadros	VI
Lista de figuras	VI
Glosario	VIII
Lista de abreviaciones y acrónimos	IX
Introducción	1
Capítulo 1. Impacto del cambio climático en el bosque templado	3
1.1 Principales impactos del cambio climático en los bosques templados	3
1.1.1 Temperatura	4
1.1.2 Precipitación	6
1.1.3 Incremento del CO ₂	7
1.2 Los bosques templados de América del Norte.....	8
1.3 Principales efectos del cambio climático en los bosques templados de América del Norte	11
1.3.1 Temperatura	12
1.3.2 Disponibilidad hídrica.....	14
1.3.3 Interacciones bióticas	16
1.4 Importancia de la conservación de los bosques templados de América del Norte	17
Capítulo 2. La reubicación controlada como estrategia de adaptación al cambio climático	19
2.1 El cambio climático y la biodiversidad.....	19
2.2 La reubicación controlada	20
2.2.1 Definición	20
2.2.2 Antecedentes.....	21
2.2.3 Principales riesgos y beneficios	22
2.2.4 Principales restricciones	24
Capítulo 3. La reubicación controlada de especies forestales en el bosque templado .	25

3.1 El caso de la Torreya de Florida (<i>Torreya taxifolia</i>)	28
3.2 Herramientas para la reubicación controlada de especies forestales	31
3.2.1 Modelos de distribución	31
3.2.2 Los bancos de semillas	32
3.2.3 Estudios demográficos y monitoreo de especies.....	33
3.2.4 Marcos de decisión para la reubicación de especies.....	34
3.3 Recomendaciones para la implementación de la reubicación controlada de especies forestales: El caso del álamo temblón (<i>Populus tremuloides</i>).....	37
Capítulo 4. Análisis de la reubicación controlada de especies forestales en el bosque templado de América del Norte como estrategia de conservación	39
4.1 Potencial de la reubicación controlada en América del Norte	39
4.2 La reubicación controlada y el manejo forestal en América del Norte	40
4.2.1 Argumentos a favor de su aplicación	41
4.2.2 Riesgos y desventajas de su aplicación	43
4.2.3 Ensayo sobre la adaptación de la migración asistida en Columbia Británica	46
4.3 El rescate de especies forestales a través de la reubicación controlada en América del Norte	49
4.3.1 Argumentos a favor de su aplicación	50
4.3.2 Riesgos y obstáculos para su aplicación	53
4.4 Estado actual de la aplicación de la reubicación controlada de especies forestales en América del Norte	54
4.5 Potencial de la aplicación de la reubicación controlada de especies forestales en América del Norte	56
Conclusión	58
Referencias	61

Lista de cuadros

Cuadro 3.1. Comparación entre los dos enfoques de la reubicación controlada de acuerdo con Pedlar <i>et al.</i> , 2012	26
---	----

Lista de figuras

Figura 1.2.1. Regiones ecológicas de Norteamérica en las que localizan principalmente los bosques templados, a) Montañas noroccidentales de coníferas, b) Bosque costero occidental, c) Bosques templados del Este y d) Sierras templadas.	10
--	----

Figura 3.1.1. En la parte superior una foto de una plántula de la Torreya de Florida. En la imagen inferior se puede observar el área de distribución actual (verde) y el sitio en el que fue llevado a cabo la reubicación controlada de las 31 plántulas de la especie en el 2008.	30
--	----

Figura 3.2.4.1. Marco de decisión lineal propuesto para evaluar la aplicación de la reubicación de especies.	35
--	----

Figura 3.2.4.2. Representación del marco de decisión multidimensional propuesto por Richardson <i>et al.</i> , (2009). La escala de los ejes es de 0-5, siendo 0 el valor más bajo, sólo en el eje de impacto colateral la escala se invierte siendo 5 el valor más bajo. El polígono con la tonalidad intermedia corresponde al valor promedio de la categoría, los polígonos más claros y oscuros corresponden al límite inferior y superior de la estimación del promedio. En este caso se evaluó hipotéticamente la reubicación controlada de la torrey de Florida por dos grupos de tomadores de decisiones (A y B) y se hizo para mostrar como dos grupos diferentes pueden llegar a diferentes conclusiones acerca de la reubicación controlada incluso teniendo la misma información.	36
---	----

Figura 4.2.1.1. a) Relación entre la temperatura media anual (grados Celsius) y el crecimiento en altura (metros) para una población hipotética de pino blanco (<i>Pinus strobus</i>) en el norte de Ontario (señalada con una estrella negra en las imágenes [b] y [c]). En la imagen la parte sombreada en gris, entre las líneas verticales, representa el	
--	--

intervalo de temperatura en el cual la población tiene una alta tasa de crecimiento. **b)** La parte sombreada en gris muestra el hábitat de la especie para las semillas provenientes de esa población en ausencia del cambio climático. **c)** La parte sombreada representa la proyección del hábitat para el período 2041-2070 basado en la versión 3.1 del modelo canadiense de circulación general y el escenario A2 de emisiones. Las líneas negras en los paneles (b) y (c) indican los límites de la distribución del pino blanco. La mayor parte de su futuro hábitat cae dentro de los límites actuales del área de distribución..... 42

Figura 4.2.2.1. Posibles casos y decisiones a tomar cuando se lleva a cabo el traslado de poblaciones con el objetivo de adaptar los hábitats gestionados al cambio climático. La decisión inicial del traslado de especies está basada en la información recopilada a lo largo de ensayos de campo y/o simulaciones, seguidas por el monitoreo para detectar la falta de adaptación. Casos (a), (b), (c), (d), y (e) representan las posibilidades de adaptación de las poblaciones locales (línea continua) y las poblaciones introducidas (línea punteada) bajo el escenario del cambio climático en relación al caso (a) (línea gris). Caso (e) corresponde a *Pinus pinaster* en el cual la falta de adaptación fue sólo aparente en consecuencia a la incidencia de eventos extremos inesperados. El asterisco indica el tiempo de una posible alerta temprana. 46

Figura 4.2.3.1. Localización de los sitios de colecta (verde) así como los sitios en donde han sido trasplantadas las especies (amarillo)..... 48

Glosario

Procedencia	Término que denota la fuente geográfica de la semilla o material vegetal o las plantas procedentes de tal fuente
Servicios ecosistémicos	Todos los beneficios que las poblaciones humanas obtienen a partir de los ecosistemas
Sistema Köppen	Sistema de clasificación del clima inventado en 1900 por el climatólogo y botánico alemán-ruso Vladimir Köppen, quien dividió la superficie terrestre en cinco principales tipos de clima, definidos por los promedios anual y mensual de temperatura y precipitación, y que coinciden con la distribución de los principales biomas

Lista de abreviaciones y acrónimos

CCA	Comisión para la Cooperación Ambiental
COFAN	Comisión Forestal para América del Norte
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IUCN	International Union for Conservation of Nature
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SCDB	Secretariat of the Convention on Biological Diversity

Introducción

Durante los últimos años el impacto de las actividades humanas ha ocasionado un desequilibrio en las condiciones de los sistemas naturales. El cambio climático es una de las consecuencias que representa una gran amenaza no solamente para las especies sino también para el bienestar humano (IPCC, 2013). Los bosques templados son una importante reserva de carbono a nivel mundial, proveen los recursos y servicios ecosistémicos necesarios para la subsistencia de un gran número de personas que dependen de ellos (CCA, 1997; Bonan *et al.*, 2008). Estos ecosistemas son además importantes para una gran diversidad de especies, puesto que proporcionan el hábitat y requerimientos adecuados para su sobrevivencia (CCA, 1997).

Debido al cambio climático se han observado aumentos en la temperatura, cambios en el régimen de precipitación, en la disponibilidad hídrica y las interacciones bióticas en los bosques templados de América del Norte (Romero-Lankao *et al.*, 2014). Estas modificaciones afectan los procesos biológicos, el equilibrio y la vulnerabilidad de las especies de estos ecosistemas. Por lo que hay una creciente preocupación acerca de cómo responderán las especies, particularmente los árboles, puesto que son las especies clave de estos ecosistemas forestales (Williams y Dumroese, 2013).

La reubicación controlada de especies forestales es una estrategia de adaptación al cambio climático cuyo potencial puede ser dirigido hacia la conservación de especies, el mantenimiento de la productividad y la salud de los bosques (*Pedlar et*

al., 2012). Sin embargo, su aplicación conlleva riesgos ecológicos que podrían afectar la composición y el funcionamiento de los ecosistemas (Ricciardi y Simberloff, 2009). A pesar de la controversia que esta estrategia implica, muchos autores consideran que habrá situaciones en las que su aplicación es altamente viable y en donde los beneficios de su implementación superen los riesgos asociados (Schwartz *et al.*, 2012).

El objetivo principal de este ensayo es analizar el potencial de la reubicación controlada, también conocida como migración asistida, como instrumento para la conservación de especies forestales del bosque templado de América del Norte ante los pronósticos del cambio climático en esta región. A partir de este objetivo, se desprenden distintos objetivos específicos que serán abordados en los 4 capítulos que conforman este ensayo. En el primer capítulo serán presentados los posibles impactos del cambio climático en los bosques y particularmente aquellos previstos para los bosques templados de América del Norte. En el segundo capítulo se definirá que es y en qué consiste la reubicación controlada como estrategia de conservación. El tercer capítulo busca presentar los trabajos existentes y que están siendo llevados a cabo para la conservación de especies forestales a través de la reubicación controlada en los bosques templados. En un cuarto capítulo, se analizarán los diferentes enfoques, las ventajas y desventajas así como los factores implicados en la implementación de la reubicación de especies en los bosques templados de América del Norte.

Capítulo 1. Impacto del cambio climático en el bosque templado

1.1 Principales impactos del cambio climático en los bosques templados

La emisión de gases de efecto invernadero así como otros factores de origen antropogénico han sido las causas del calentamiento global observado a partir de la década de 1950 (IPCC, 2013). En consecuencia, la temperatura de la atmósfera y el océano se ha incrementado, la cantidad de hielo y de nieve ha disminuido, asimismo el nivel del mar se ha elevado (IPCC, 2013). Todos estos cambios han afectado el equilibrio y las condiciones de los sistemas biológicos de nuestro planeta, siendo los bosques parte de los ecosistemas amenazados. Estos últimos poseen un gran valor dado que albergan una gran diversidad biológica y proveen diversos servicios ecosistémicos (SCDB, 2010).

Los bosques cubren alrededor del 31% de la superficie total de la Tierra, que equivale aproximadamente a 4,000 millones de hectáreas, y albergan a más de dos terceras partes de las especies terrestres (SCDB, 2010). Además de su valor biológico, también son importantes para las poblaciones humanas ya que hay cerca de 1,600 millones de personas en el mundo que dependen de estos ecosistemas para su subsistencia (SCDB, 2010). Actualmente, la principal amenaza a la que se enfrentan los bosques es la deforestación, a pesar de que durante los últimos años la tasa de deforestación ha disminuido, se calcula que cada año son deforestadas 13 millones de hectáreas de bosque (SCDB, 2010).

Los bosques templados representan alrededor del 20% de la biomasa vegetal y el 10% del carbón terrestre a nivel mundial (Bonan *et al.*, 2008). En el pasado, una gran

parte de los bosques templados del este de Estados Unidos, Europa y del este de China fueron reemplazados por tierras agrícolas (Bonan *et al.*, 2008). Actualmente, gracias a los programas de reforestación y al control de incendios forestales, los bosques templados se han convertido en sumideros de carbono y se espera que continúen aumentando la captura de carbono por lo menos durante las dos próximas décadas (Bonan *et al.*, 2008; Thompson *et al.*, 2009).

El impacto del cambio climático provocará que los bosques templados estén expuestos a nuevas condiciones ambientales. En consecuencia, se prevé que debido al aumento de la temperatura haya un incremento en el metabolismo, en la respiración de las plantas y en la descomposición de materia orgánica. Por lo que se espera que las funciones biológicas y los servicios ecosistémicos que estos bosques proporcionan se vean afectados de manera significativa en los próximos 50 a 100 años. (Thompson *et al.*, 2009).

1.1.1 Temperatura

Los bosques templados presentan una alta sensibilidad a los incrementos en temperatura, ya que este aumento puede acelerar los procesos biológicos que tienen lugar en estos ecosistemas (Thompson *et al.*, 2009). Las observaciones actuales ponen en evidencia los impactos ecológicos provocados por el aumento de la temperatura y que han afectado a las especies vegetales de estos ecosistemas en los últimos años. En diferentes estudios, se han observado cambios en la fenología de algunas especies, por ejemplo, en ciertas plantas la germinación y la floración se presentan de manera anticipada, la estación de crecimiento tiene una mayor duración y hay atrasos en el

cambio de coloración de las hojas de los árboles en otoño en algunas regiones de Europa y América del Norte (Walther *et al.*, 2002; Parmesan y Yohe, 2003). Además, se ha observado que en respuesta al aumento de la temperatura, la distribución de algunas especies de árboles se ha modificado. Por ejemplo, en las *Green Mountains* de Vermont, en América del Norte, se ha observado que la distribución de los árboles se ha desplazado hacia mayores altitudes, los cambios observados varían entre 91 hasta 119 m en especies como el arce de azúcar (*Acer saccharum*), el haya americana (*Fagus grandifolia*) y el abedul amarillo (*Betula alleghaniensis*) (Beckage *et al.*, 2008).

Debido al aumento de la temperatura se espera que las especies arbóreas, especies clave de los ecosistemas forestales, responderán a los cambios ambientales ya sea a través de la migración, la adaptación o la extirpación, es decir la extinción de la población de una especie (Aitken *et al.*, 2008). En otras palabras, esto significa que habrá ciertas especies que podrán persistir a través de la migración, puesto que lograrán mantenerse espacialmente en sus nichos ecológicos. Por otro lado, algunas especies podrán asegurar su permanencia a través de la adaptación a las nuevas condiciones ambientales, sin embargo, aquellas que sean incapaces de migrar o adaptarse, se extinguirán (Aitken *et al.*, 2008). Actualmente, a través de la utilización de modelos de distribución es posible pronosticar la manera en que las diferentes especies de árboles responderán ante estos cambios ambientales. En las zonas templadas, los modelos prevén que la distribución de la mayoría de las especies se desplazará en dirección a los polos y hacia mayores altitudes (Iverson *et al.*, 2008; Morin *et al.*, 2008). Actualmente, se han observado cambios en la distribución de las especies de estas zonas y éstos coinciden con lo esperado bajo el efecto del

calentamiento global e incluso en las zonas en donde ha habido mayores incrementos de temperatura los cambios también suelen ser mayores (Beckage *et al.*, 2008, Chen *et al.*, 2011).

Además de los efectos negativos anteriormente mencionados, en las especies vegetales y en específico en las especies arbóreas, las tasas de crecimiento pueden ser incrementadas por temperaturas más cálidas. Debido al aumento de la temperatura, los procesos metabólicos de los árboles se incrementan y esto permite que acumulen una mayor cantidad de biomasa. Aunque esto se presenta, sólo si las condiciones de humedad y la disponibilidad de nutrientes son adecuadas (McMahon *et al.*, 2010). De igual manera, este aumento ha ocasionado una reducción de la duración del invierno y un adelanto en el inicio de la primavera que en consecuencia ha provocado que la estación de crecimiento de las plantas tenga una mayor duración (Walther *et al.*, 2002; McMahon *et al.*, 2010).

1.1.2 Precipitación

A escala global, se han observado cambios en la precipitación debido al cambio climático, por ejemplo en las zonas de latitud media del hemisferio norte (30°N a 60°N), la tendencia del período de 1901-2008 muestra un aumento significativo de la precipitación (Hartmann *et al.*, 2013). Los bosques templados son sensibles a los cambios de precipitación puesto que la producción primaria neta está relacionada con la variación interanual de la precipitación, así como con la frecuencia y periodicidad de la época de secas (Weltzin *et al.*, 2003). Asimismo se ha observado que los cambios de

precipitación, en conjunto con los cambios de temperatura, han afectado la distribución de los árboles en los bosques templados (Beckage *et al.*, 2008).

En cuanto a las precipitaciones en forma de nieve, se ha observado que en las zonas donde la temperatura invernal se ha incrementado, las nevadas han disminuido. Este fenómeno se ha presentado principalmente en América del Norte, Europa y el este de Asia (Hartmann *et al.*, 2013). En consecuencia, los bosques templados de estas regiones son afectados, por ejemplo, en el oeste de Estados Unidos se ha visto que las nevadas han disminuido y que durante el invierno en lugar de presentarse precipitaciones en forma de nieve se presentan en forma de lluvia (Hartmann *et al.*, 2013). El crecimiento de los árboles de esta región así como otros procesos ecológicos pueden ser alterados, puesto que la acumulación de nieve, así como el almacenamiento del agua en el suelo y las aguas subterráneas son necesarios para asegurar la disponibilidad de agua durante el verano (Boisvenue y Running, 2006).

1.1.3 Incremento del CO₂

Las concentraciones elevadas de CO₂ atmosférico, originadas principalmente por el uso de combustibles fósiles, pueden tener un efecto fertilizante en las plantas. Esto se debe a que los niveles elevados de CO₂ favorecen una mayor actividad fotosintética y una disminución en la transpiración, lo que al mismo tiempo da lugar a un incremento en la eficiencia del uso del agua en las plantas e incrementa la productividad primaria neta (Ciais *et al.*, 2013). Sin embargo, la baja disponibilidad de nutrientes en el suelo limita la captura de carbono en los bosques (Oren *et al.*, 2001). Particularmente, la disponibilidad del nitrógeno y del fósforo serán muy probablemente dos de los factores

limitantes para el efecto fertilizante del CO₂ en los bosques, siendo principalmente el nitrógeno el nutriente limitante en los ecosistemas templados y boreales (Ciais *et al.*, 2013).

1.2 Los bosques templados de América del Norte

Los bosques templados incluyen a los bosques de coníferas, bosques de árboles de hojas anchas o latifoliados que pueden ser perennes o deciduos, el bosque mixto, así como bosques ribereños y aluviales (IUCN, 2007). En este tipo de ecosistemas, el clima presenta una estacionalidad anual muy marcada. Durante el invierno la temperatura suele descender más allá de los 0° C, pueden presentarse heladas y nevadas, mientras que los veranos son comúnmente cálidos y húmedos (FAO, 1999; Sánchez *et al.*, 2003). La cantidad de lluvia, así como los patrones de precipitación son importantes para diferenciar los tipos de bosque templado que existen (Ricklefs y Miller, 1999). El tipo de clima asociado a este ecosistema es el Cfa y Cfb del sistema de Köppen (Sánchez *et al.*, 2003). El tipo de clima C corresponde a un clima templado húmedo con veranos cálidos e inviernos fríos, mientras que el sufijo f hace referencia a la presencia de lluvias a lo largo del año. Los sufijos a y b hacen indican un verano cálido con una temperatura promedio mayor o menor a 22°C, respectivamente (Sánchez *et al.*, 2003).

La localización geográfica de los bosques templados se extiende desde los trópicos hacia los polos, hasta latitudes cercanas a los 50° en ambos hemisferios (FAO, 1999), particularmente, en las regiones templadas al sur y al norte del continente americano, en Europa, Asia, Australia y Nueva Zelanda (IUCN, 2007). En las zonas

más cercanas a los trópicos, por ejemplo en el caso de México, la ubicación de los bosques templados está estrechamente asociada con la altitud, por lo que estos bosques se localizan en las zonas montañosas cuya altitud oscila entre 800m hasta 3,400m (Sánchez *et al.*, 2003; Challenger y Soberón, 2008).

La región de América del Norte, conformada por Canadá, Estados Unidos y México, presenta una gran diversidad biológica, que posee ecosistemas particulares e únicos y que además tiene una gran extensión de bosques, la tercera parte de esta región está ocupada por estos ecosistemas forestales (CCA, 1997; Weed *et al.*, 2013). Debido a lo antes mencionado, en 1997 la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) propuso una clasificación de las regiones ecológicas de este continente (Figura 1.2.1). Los bosques templados se localizan principalmente en 4 de las regiones primarias de dicha clasificación:

- Montañas noroccidentales de coníferas
- Bosque costero occidental
- Bosques templados del Este
- Sierras templadas

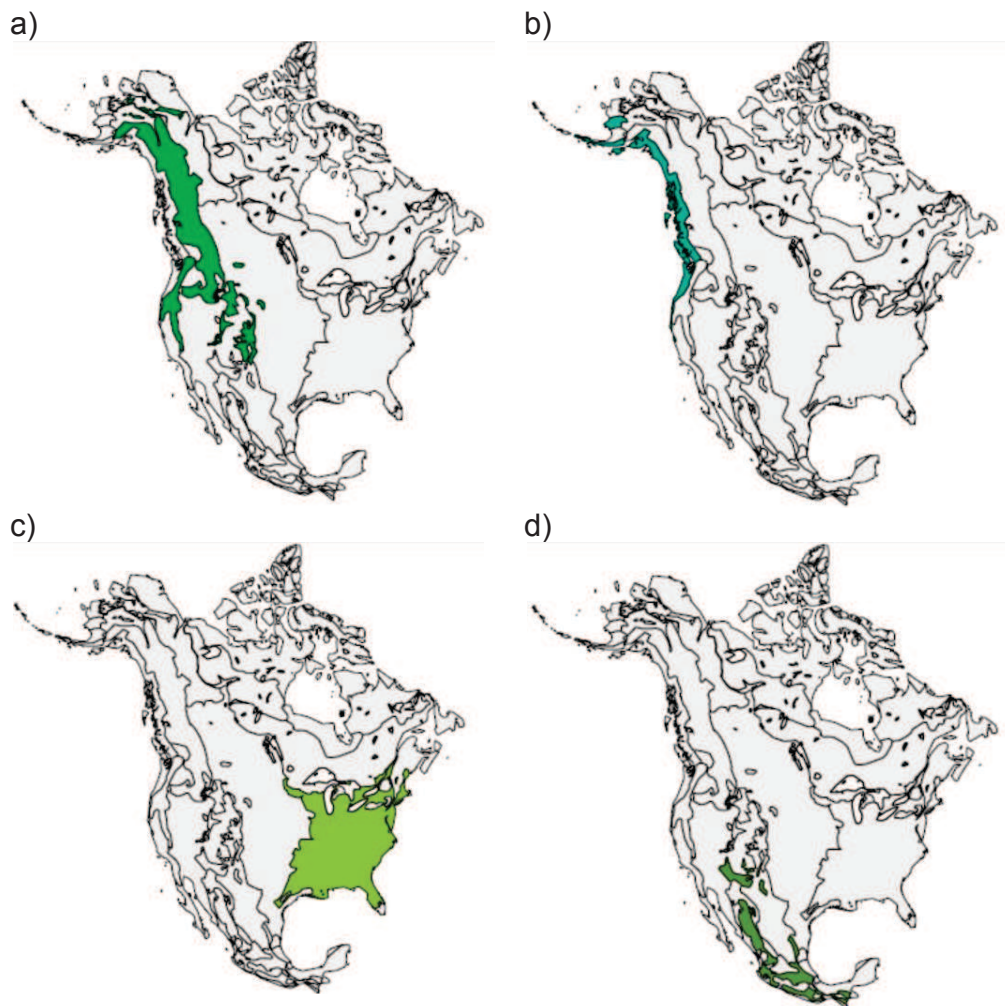


Figura 1.2.1. Regiones ecológicas de Norteamérica en las que localizan principalmente los bosques templados, a) Montañas noroccidentales de coníferas, b) Bosque costero occidental, c) Bosques templados del Este y d) Sierras templadas.
Fuente: CCA, 1997

Algunos de los bosques templados de América del Norte son dominados sobre todo por árboles caducifolios latifoliados como los robles, arces, hayas, abedules y nogales, estos bosques deciduos suelen presentarse en regiones en donde la precipitación suele ser mayor a la evapotranspiración, que poseen buen drenaje y en donde los inviernos son menos extremos (Ricklefs y Miller, 1999). Los bosques templados dominados por árboles perennes latifoliados, como las secuoyas de

California, se encuentran en zonas en donde hay una mayor humedad y que presentan lluvias intensas durante el invierno (Ricklefs y Miller, 1999). Respecto a los bosques templados dominados por coníferas, como es el caso de los abetos, éstos se presentan en zonas que poseen una baja disponibilidad de nutrientes y de agua (Ricklefs y Miller, 1999). Además, se pueden presentar bosques templados con características mixtas, en donde las formaciones vegetales dominantes están compuestas por la presencia de especies latifoliadas y de coníferas (CCA, 1997).

1.3 Principales efectos del cambio climático en los bosques templados de América del Norte

El impacto del cambio climático en América del Norte puede notarse en las tendencias observadas en los últimos años, que incluyen el aumento de la temperatura media anual, el aumento de la frecuencia de fenómenos meteorológicos como las olas de calor, la disminución del período de heladas y de la capa de nieve, así como el aumento de fuertes precipitaciones en la mayor parte del continente (Romero-Lankao *et al.*, 2014). Del mismo modo, se espera que las temperaturas sigan aumentando a lo largo del siglo XXI, con aumentos de entre 2° y hasta 4°C, que podrían ser aún mayores en las zonas de altas latitudes (Romero-Lankao *et al.*, 2014). Los bosques templados de América del Norte son vulnerables a estos cambios de las condiciones ambientales. De manera general, se espera que la productividad de estos ecosistemas se verá beneficiada por el aumento de la temperatura y del CO² atmosférico, sin embargo en algunas regiones esta productividad podría verse limitada por la falta de agua o de nutrientes (Peters *et al.*, 2013). Por otro lado, el cambio climático puede al mismo tiempo afectarles de manera indirecta a través de los cambios en los disturbios

que tienen lugar en estos sitios, como los incendios forestales, las tormentas, los insectos y las enfermedades (Field *et al.*, 2007).

1.3.1 Temperatura

Los efectos del calentamiento global son diferentes en los tres países de América del Norte debido a la localización geográfica de cada uno de ellos, a mayor latitud el aumento de la temperatura es más pronunciado puesto que estas regiones se encuentran más cercanas a los polos. Las predicciones actuales muestran que las zonas de alta latitud de Estados Unidos y Canadá, son las que presentarán los mayores aumentos de temperatura, que para finales del siglo XXI podrían ser mayores a 6°C, y se espera además un aumento en la precipitación en sitios localizados en latitudes superiores a 45° N (Romero-Lankao *et al.*, 2014). En áreas al sur de Estados Unidos y de México, el aumento de la temperatura será menor, con un posible aumento de 4°C para finales del siglo XXI, y se espera también que haya una disminución en la precipitación (Romero-Lankao *et al.*, 2014).

En América del Norte, así como en otras regiones, se espera que ante el aumento de la temperatura la distribución de las especies se desplazará en dirección a los polos y hacia mayores altitudes (Thomas *et al.*, 2004) y los árboles no son la excepción a este pronóstico (Iverson *et al.*, 2008; Morin *et al.*, 2008). Asimismo, los cambios observados en la distribución de ciertas especies de árboles de América del Norte en los últimos años coinciden con lo que se espera bajo el efecto del cambio climático. Es decir, se ha observado que los árboles se han desplazado hacia mayores altitudes y hacia zonas más allá del límite norte de su área de distribución (Parmesan y

Yohe 2003; Beckage *et al.*, 2008; Woodall *et al.*, 2009; Savage y Vellend, 2014). Todo parece indicar que debido al aumento de la temperatura, estas zonas se han vuelto propicias para su establecimiento, sobre todo en términos de temperatura. Debido a esto, se prevé que los cambios de las condiciones climáticas favorecerán la expansión de los bosques templados hacia el norte y hacia mayores altitudes, particularmente en algunas regiones de Canadá, en zonas cuyo tipo de vegetación actual es la taiga y la tundra (Rehfeldt *et al.*, 2012). En algunos casos, el aumento de la temperatura ha coincidido además con un aumento en la precipitación que ha favorecido el establecimiento de las especies arbóreas (Beckage *et al.*, 2008).

Actualmente, ya hay evidencia de la migración hacia el norte de algunas especies del bosque templado del este de Estados Unidos. En un estudio realizado con 40 especies de esta región, se encontró que 17 de ellas presentan una mejor regeneración en las zonas al norte de su distribución y que esto se debe al aumento de la temperatura durante los últimos años (Woodall *et al.*, 2009). Entre los árboles en los que se detectó esta migración hacia el norte se encuentran especies tales como el tilo americano (*Tilia americana*), el álamo americano de hoja dentada (*Populus grandidentata*) y el abedul amarillo (*Betula alleghaniensis*), entre otras. Las tendencias observadas sugieren que la migración hacia el norte continuará y que incluso podría acelerarse en el futuro (Woodall *et al.*, 2009). Del mismo modo, se espera que las zonas al sur de su distribución actual ya no serán adecuadas para su persistencia, por lo que es de esperarse que algunas de ellas desaparecerán en dichas zonas (Morin *et al.*, 2008). Es importante notar que aunque las predicciones de los cambios de distribución de un gran número de especies coinciden en una probable migración hacia

el norte y hacia mayores altitudes, es posible que otros factores como la humedad, la fragmentación del hábitat y el tipo de suelo podrían obstaculizar este proceso a nivel regional o local (Warren, 2004; Lafleur *et al.*, 2010).

El aumento de la temperatura también ha afectado la fenología de las plantas en los bosques de América del Norte en los últimos años y se ha observado un inicio anticipado de la primavera en algunas regiones del este de Canadá (Beaubien y Hall-Beyer, 2003). Por otro lado, el cambio climático causa cambios en la temperatura sin que haya cambios en la duración del día, esto puede afectar el desarrollo de las plantas, puesto que las especies están localmente adaptadas a señales que consisten en una determinada combinación de luz y temperatura (Beaubien y Hall-Beyer, 2003). Asimismo, la adaptación de las especies arbóreas caducifolias a los cambios de temperatura dependerá sobre todo del equilibrio entre el inicio y el fin del período de dormancia, de manera que puedan aprovechar al máximo la estación de crecimiento minimizando al mismo tiempo los daños causados por las heladas (Saxe *et al.*, 2001). Sin embargo, la adaptación de las plantas a estas nuevas condiciones puede ser lenta en comparación con los cambios previstos del aumento de la temperatura, especialmente para aquellas especies que presentan un largo intervalo de tiempo entre sus diferentes generaciones (Saxe *et al.*, 2001).

1.3.2 Disponibilidad hídrica

Mientras que el aumento de la temperatura en las regiones al norte da lugar a condiciones climáticas favorables para la expansión del bosque templado, en otros sitios este aumento podría afectar el crecimiento de los árboles si el agua se convierte

en un factor limitante (McMahon *et al.*, 2010). Por ejemplo, al oeste de Estados Unidos y en México, los cambios en las condiciones ambientales favorecerán el aumento de ecosistemas más áridos y está previsto que en el futuro algunas de estas zonas, que actualmente son ocupadas por bosques templados, podrían llegar a ser reemplazadas por bosques tropicales caducifolios y matorral xerófilo (Rehfeldt *et al.*, 2012).

Al oeste de Estados Unidos se ha observado que los cambios hidrológicos de la región, tales como la disminución en la capa de nieve, el deshielo anticipado y una mayor duración del período de secas en verano, están relacionados con el aumento de la temperatura de las últimas décadas (van Mantgem *et al.*, 2009). En consecuencia, la tasa de mortalidad de los árboles que ahí se encuentran ha aumentado con gran rapidez en los últimos años, puesto que éstos deben enfrentarse a un déficit hídrico, que cuando se prolonga los deja expuestos a condiciones de sequía que afectan su sobrevivencia (van Mantgem *et al.*, 2009). Asimismo, los pronósticos actuales sugieren que habrá una disminución del hábitat, para algunas especies del bosque templado en México. Debido al aumento de la temperatura y al estrés causado por la sequía, como resultado de un posible incremento de la duración del período seco (Gómez Díaz *et al.*, 2011).

En otros sitios, por ejemplo en algunos bosques al este de Canadá, está previsto que además del aumento de la temperatura habrá un aumento en la precipitación. Sin embargo, este aumento no implica una mayor disponibilidad de agua en el suelo para las plantas (Houle *et al.*, 2012). De hecho, los modelos pronostican una disminución en la humedad del suelo al inicio de la temporada de crecimiento, debido a deshielos anticipados. Aunado a una mayor evapotranspiración, producida por el aumento de la

temperatura, se espera una disminución de entre el 20 y 40% de la humedad del suelo durante la temporada de crecimiento (Houle *et al.*, 2012). De acuerdo con lo anterior, los cambios en la disponibilidad hídrica podrían tener un impacto significativo en el crecimiento de los bosques y en los ciclos biogeoquímicos (Houle *et al.*, 2012).

Por otra parte, se ha observado que la reducción de las precipitaciones invernales, el deshielo anticipado, las primaveras más cálidas y los veranos más secos están relacionados con el aumento en la frecuencia de incendios forestales en los bosques del este de Estados Unidos (Westerling *et al.*, 2006). Es de esperarse que si el cambio climático da lugar a veranos más cálidos y secos, que son dos factores implicados en el aumento de incendios forestales más extensivos y frecuentes, es probable que la abundancia y distribución de las especies de plantas dominantes en los ecosistemas forestales se vea afectada (McKenzie *et al.*, 2004).

1.3.3 Interacciones bióticas

Los brotes de insectos son otra de las perturbaciones naturales de los bosques que son vulnerables al efecto del cambio climático. Las poblaciones de insectos presentan una gran capacidad de respuesta a los cambios climáticos, puesto que influyen su sobrevivencia, abundancia, propagación y distribución (Weed *et al.*, 2013). Se espera que para la mayoría de los insectos de las zonas templadas, el aumento de la temperatura probablemente amplificará su área de distribución hacia mayores latitudes y altitudes. Asimismo, es posible que incremente también la velocidad de desarrollo durante la fase de crecimiento (Jeffery *et al.*, 2002). Actualmente, las plagas de insectos se han vuelto muy notorias en los bosques de

América del Norte, y se han presentado grandes infestaciones en bosques de Canadá y Estados Unidos. Por lo que, se espera que estas perturbaciones puedan tener una gran influencia en los ecosistemas y la economía de la región en el futuro (Romero-Lankao *et al.*, 2014).

1.4 Importancia de la conservación de los bosques templados de América del Norte

Los bienes y servicios que los bosques templados de América del Norte proporcionan son muy importantes debido en gran parte al elevado número de personas que viven en las zonas cercanas a ellos. Aproximadamente, se calcula que cerca del 40% de la población total de América del Norte vive en la región ecológica de los bosques templados del Este, en México las zonas urbanas más grandes se localizan en la región que corresponde a las sierras templadas (CCA, 1997).

También, en estos bosques se desarrollan diversas actividades económicas de gran interés principalmente para la industria forestal. Por ejemplo, los bosques costeros occidentales son los más productivos de América del Norte por lo que la silvicultura es la principal actividad económica de la región y aquí son realizadas las operaciones forestales más importantes de Canadá y Estados Unidos. Asimismo, las plantaciones de pino situadas en el sur de la región de los bosques templados del Este son una fuente de pulpa y papel. Por su parte, las especies arbóreas de las sierras templadas proveen aproximadamente el 80% del abastecimiento de madera en México (CCA, 1997).

Los bosques templados de América del Norte albergan a una gran diversidad de especies, por ejemplo mamíferos como el borrego cimarrón, el oso negro, alces, lobos y pumas, entre otros. De hecho, en algunos bosques templados situados en la región de las montañas noroccidentales de coníferas se han establecido parques nacionales y provinciales así como reservas de hábitat para la fauna silvestre (CCA, 1997). Algunos bosques templados poseen también una alta diversidad de especies arbóreas, tal es el caso de la región de las sierras templadas, en donde se estima que hay 41 especies de pinos y más de 150 especies de encinos (CCA, 1997).

En el pasado, los bosques templados de América del Norte fueron transformados en tierras agrícolas y asentamientos humanos. El cambio de uso de suelo, las prácticas inapropiadas de manejo forestal y la extracción forestal son las principales amenazas a las que se encuentran sujetos estos ecosistemas (CCA, 1997). Sin embargo, la resiliencia que poseen les da la capacidad de recuperarse de los disturbios y perturbaciones a los que son sometidos. Bajo el escenario del cambio climático, es de esperarse que la combinación de diferentes factores de estrés a los cuales no están adaptados, tales como el aumento de la temperatura y las sequías, puedan superar su resiliencia. Por lo que es posible que no todos los tipos de bosques y sus especies logren recuperarse adecuadamente en caso de experimentar algún disturbio (Thompson *et al.*, 2009).

Capítulo 2. La reubicación controlada como estrategia de adaptación al cambio climático

2.1 El cambio climático y la biodiversidad

El cambio climático representa una amenaza para la biodiversidad y está previsto que se volverá una de las principales causas de extinción de especies en el futuro próximo (Thomas *et al.*, 2004). Algunos modelos calculan un alto riesgo de extinción para un gran número de especies, por ejemplo, los resultados de un meta-análisis realizado con la información disponible de 1,103 especies, tanto de plantas como de animales de diferentes regiones, para el año 2050 pronostican que entre el 15 y 37% de las especies analizadas estarán extintas (Thomas *et al.*, 2004).

Bajo el escenario del cambio climático, la permanencia de las especies vulnerables dependerá no solamente de que las condiciones climáticas favorables para su existencia perduren. Sino también de que las especies sean capaces de responder y de adaptarse, a la misma velocidad a la que el clima está cambiando (Loarie *et al.*, 2009). En efecto, la evidencia actual sugiere que algunas especies no serán capaces de dispersarse o de adaptarse a la misma velocidad a la que el clima está cambiando (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2008). Por ejemplo, especies cuyos tamaños poblacionales son pequeños, que tienen una baja fecundidad, baja variación genética y tiempos de generación largos (Aitken *et al.*, 2008).

Por lo que, es probable que las prácticas de conservación actuales, puedan no ser suficientes para contrarrestar la pérdida de especies frente a las proyecciones del aumento de la temperatura de los próximos años (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2008).

Además la fragmentación y el estado actual de los hábitats, así como la presión que ejerce la población humana, agravan la pérdida del hábitat de muchas especies afectando al mismo tiempo su dispersión y establecimiento (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2008; Schwartz *et al.* 2012).

2.2 La reubicación controlada

2.2.1 Definición

La reubicación controlada es una estrategia de adaptación al cambio climático, que surge con el fin de reducir los efectos negativos de este fenómeno. Principalmente el impacto en los servicios ecosistémicos y la extinción de especies (Richardson *et al.*, 2009). Esta estrategia forma parte de la adaptación asistida que busca, a través de la intervención humana, incrementar las capacidades de los organismos, ecosistemas o sistemas socio-ecológicos para que éstos perduren y funcionen de manera adecuada bajo el efecto del cambio climático (Settele *et al.*, 2014).

De acuerdo con la definición de Schwartz *et al.* (2012) *“La reubicación controlada consiste en el acto intencional de trasladar especies, poblaciones o genotipos hacia lugares fuera de su área de distribución histórica, con el propósito de mantener la diversidad biológica o el funcionamiento del ecosistema, como una estrategia de adaptación ante el cambio climático”*.

De manera simplificada, esta estrategia está basada en la reubicación de organismos, a partir de sus zonas de ocupación actual hacia sitios en donde se prevé que su probabilidad de persistencia en el futuro será mayor (Richardson *et al.*, 2009) Los objetivos de esta estrategia son mantener la diversidad genética, proteger a las

especies de la extinción, emular la dispersión interrumpida por las barreras humanas, mantener la funcionalidad de los ecosistemas y preservar las poblaciones utilizadas para la extracción de recursos naturales (Schwartz *et al.*, 2012).

En la literatura, este término ha sido empleado como sinónimo de colonización asistida, migración asistida, migración facilitada, expansión asistida del hábitat, translocación de especies y translocación gestionada (Hewitt *et al.*, 2011; Schwartz *et al.* 2012). Aunque las definiciones de estos conceptos están relacionadas entre sí pueden variar, sin embargo todos describen el movimiento asistido de poblaciones de especies con el propósito de mitigar la pérdida de la biodiversidad. En este trabajo se utiliza el término de reubicación controlada, considerando que define de manera más clara y precisa esta estrategia.

2.2.2 Antecedentes

De acuerdo con Hewitt *et al.* (2011), esta estrategia fue propuesta inicialmente en el trabajo de Peters y Darling (1985) como una opción de manejo para las reservas naturales. En este trabajo, los autores proponen el traslado de organismos hacia nuevas reservas, en el caso de que las condiciones de sus reservas de origen se vuelvan inadecuadas para su subsistencia debido al cambio climático. Dado que probablemente muchas especies no lograrán adaptarse exitosamente a los cambios climáticos. Los autores justifican esta propuesta en lo observado en el registro fósil, ya que en el pasado, durante los períodos glaciales e interglaciares, se observa que muchas especies no lograron adaptarse a los cambios en el clima y esto se debió probablemente a tasas de migración lenta y a la presencia de barreras geográficas

como océanos, montañas o áreas con condiciones no adecuadas, que impidieron que los organismos lograran establecerse en nuevos hábitats (Peters y Darling, 1985).

Actualmente, hay un gran controversia acerca de la implementación de la reubicación controlada como estrategia de conservación debido a los riesgos potenciales, siendo el principal riesgo que la especie reubicada se vuelva invasora en el ecosistema al cual sea trasladada y que en consecuencia altere las comunidades bióticas ya establecidas (Ricciardi y Simberloff, 2009). También hay una falta de certeza en cuanto a las consecuencias que esta medida podría generar, por ejemplo no se puede predecir con certeza el impacto que tendrá una nueva especie en la composición y el funcionamiento de un ecosistema (Ricciardi y Simberloff, 2009). Además de los factores biológicos involucrados, también hay cuestiones éticas y legales involucradas que deben ser consideradas (Hewitt *et al.*, 2011; Schwartz *et al.* 2012). A pesar de la incertidumbre que esta estrategia involucra, hay algunos casos documentados de la aplicación de esta medida con diferentes organismos. Por ejemplo el árbol torreyya de Florida (*Torreya taxifolia*) en Estados Unidos y dos especies de mariposas en el Reino Unido (Schwartz *et al.* 2012).

2.2.3 Principales riesgos y beneficios

Una revisión de la literatura relacionada con la reubicación controlada fue realizada por Hewitt *et al.* (2011), los principales riesgos y beneficios de la implementación de la reubicación controlada fueron enlistados por los autores. Entre los principales beneficios está prevenir la extinción de especies y proteger la

biodiversidad. Principalmente, a las especies cuyas características particulares las vuelven más vulnerables al cambio climático, por ejemplo aquellas que presentan una baja dispersión, que son raras, que tienen baja fecundidad y tiempos de generación largos o cuya distribución geográfica les impedirán desplazarse hacia nuevos hábitats.

El riesgo más común, considerado también como el de mayor importancia, es que las especies introducidas se vuelvan invasoras y que entonces sean perjudiciales para los sitios en los que fueron reubicadas, además de que es muy difícil y poco probable revertir el impacto de las especies invasoras (Hewitt *et al.*, 2011). También existe la posibilidad de que en caso de implementar la reubicación de especies, pueda haber menos recursos disponibles para otras estrategias de conservación de la biodiversidad e incluso en algunos casos podría suceder que se asigne un menor valor de conservación a los sitios en los que las especies candidatas podrían ser reubicadas (Hewitt *et al.*, 2011).

Actualmente, el debate acerca de la implementación de esta medida gira alrededor del potencial de la reubicación controlada para proteger a las especies de la extinción, contra su potencial para provocar la pérdida de especies, esto en caso de que la especie reubicada se volviera invasora (Hewitt *et al.*, 2011). Para una aplicación adecuada de esta estrategia, es necesario comparar todos los posibles riesgos y beneficios derivados de su aplicación, tanto para la especie que sea reubicada, como para el ecosistema en donde sea introducida (Schwartz *et al.* 2012). Asimismo, muchos autores coinciden en que esta medida sólo debería ser implementada en situaciones donde los riesgos no sean mayores que las ventajas (Hewitt *et al.*, 2011). Aunque la aplicación de la reubicación controlada implica riesgos y sus posibles impactos no

pueden ser pronosticados con certeza, algunos autores coinciden en que el rechazo a esta estrategia podría incrementar considerablemente la extinción de especies causada por el cambio climático (McLachlan *et al.*, 2007; Schwartz *et al.* 2012).

2.2.4 Principales restricciones

Una de las principales restricciones de la implementación de la reubicación controlada, es que no existe suficiente información ecológica que permita asegurar el éxito de la reubicación de las especies, y aún no es posible anticipar el potencial de migración de éstas (Hewitt *et al.*, 2011). Esto se debe principalmente a que hay una falta de información acerca de la distribución actual de las especies y a que no hay programas que monitoreen la respuesta de éstas a los cambios globales a escala nacional (McLachlan *et al.*, 2007). Es necesario mejorar los modelos de los escenarios futuros de la distribución de las especies bajo el efecto del cambio climático y además las predicciones de dichos modelos son limitadas y pueden no ser aplicables a todas las especies, puesto que asumen que la distribución de las especies está restringida principalmente por las condiciones climáticas (McLachlan *et al.*, 2007).

Asimismo, las interacciones entre las especies podrían representar un obstáculo para lograr una reubicación exitosa. Por lo que es necesario estudiar las interacciones potenciales que podrían producirse en caso de la reubicación de una especie y también se debe estudiar como las especies que serán reubicadas podrían alterar las interacciones de los ecosistemas a los cuales sean introducidas (McLachlan *et al.*, 2007). De igual manera, es indispensable estimar el potencial de dispersión de las especies para elegir a las especies candidatas para ser reubicadas, por ejemplo

aquellas especies cuya potencial de dispersión sea bajo, ya que este valor es un indicador de la capacidad de la especie de trasladarse hacia nuevos hábitats disponibles en respuesta al cambio climático (McLachlan *et al.*, 2007).

La implementación de la reubicación controlada implica además una serie de retos operacionales que probablemente limitarán su gestión, por ejemplo altos costos económicos, los límites políticos o el fracaso en el establecimiento de las especies reubicadas (Hewitt *et al.*, 2011). Del mismo modo, las agencias gubernamentales deberán adaptar las leyes y políticas actuales con la finalidad de crear un marco normativo apropiado para regular la aplicación de la reubicación controlada (Schwartz *et al.* 2012).

Capítulo 3. La reubicación controlada de especies forestales en el bosque templado

Los cambios observados en el clima durante los últimos años muestran que el clima está cambiando a una velocidad que es mayor a la que las plantas pueden adaptarse (Williams y Dumroese, 2013). Las especies con ciclos de vida largos, como los árboles, están en desventaja ante el cambio climático en comparación con aquellas cuyos ciclos de vida son cortos, puesto que su tasa de adaptación es más baja y esto puede provocar un retraso de la respuesta de los árboles a estos cambios (Aitken *et al.*, 2008; Williams y Dumroese, 2013). Este desajuste entre la velocidad del clima y la adaptación de los árboles tendrá un impacto en el crecimiento y composición de los bosques, así como en su manejo y conservación, puesto que los árboles son las

especies clave de los ecosistemas forestales y poseen además un gran valor económico (Williams y Dumroese, 2013).

De acuerdo con Pedlar *et al.* (2012), la reubicación controlada de especies forestales puede tener dos enfoques. El primero es el uso de esta estrategia para el “rescate de especies”, es decir para evitar la extinción de aquellas cuya existencia está amenazada por el rápido avance del cambio climático. El segundo consiste en dirigirla hacia las prácticas de manejo forestal. Este enfoque tiene como objetivo asegurar que en las plantaciones de árboles sean utilizadas semillas que estén adaptadas al clima con el propósito de mantener la productividad forestal, la salud y los servicios de estos ecosistemas ante el cambio climático. En el cuadro 3.1 se comparan los principales aspectos de ambos enfoques.

Cuadro 3.1. Comparación entre los dos enfoques de la reubicación controlada de acuerdo con Pedlar *et al.*, 2012

Tema	Reubicación controlada en el manejo forestal	Reubicación controlada para el rescate de especies
Resultado previsto	Mantener la productividad y salud del bosque ante el cambio climático	Evitar la extinción de especies amenazadas por el cambio climático
Especies objetivo	De amplia distribución y de importancia comercial	Importantes para la conservación
Principal unidad biológica	Se centra en el movimiento de poblaciones	Se centra en el movimiento de especies
Logística del movimiento	Habitualmente, dentro del área de distribución actual o movimientos discretos fuera de su área de distribución	A menudo, muy alejados del área de distribución actual de las especies
Riesgos	Potencial limitado para crear una especie exótica invasiva, para hibridar con nuevas especies y para introducir enfermedades en las nuevas poblaciones u otras especies	Cierto potencial para crear una especie exótica invasiva, para hibridar con nuevas especies y para introducir enfermedades en las otras especies.
Viabilidad de la	Disponibilidad de los datos de	Datos de procedencia suelen no

aplicación basada en la ciencia	procedencia de muchas especies comerciales de árboles, métodos de colecta y almacenamiento de semillas establecidos, buenas prácticas en el establecimiento de plantaciones y la autecología de las especies es usualmente bien conocida.	estar disponibles, las semillas no han sido adquiridas o almacenadas, las prácticas de establecimiento de especies a menudo no son conocidas y se conoce la autoecología de relativamente pocas especies de alto perfil que han sido bien estudiadas.
Alcance	Posibilidad de ser empleada a lo largo de millones de hectáreas que son regeneradas cada año en América del Norte	Limitada a micrositios adecuados
Costo	Añade un bajo valor al costo de la regeneración de las plantaciones	Los costos pueden variar dependiendo del alcance de la iniciativa
Aplicación	Ya implementada en diferentes regiones	Muy pocos casos conocidos de su implementación

Fuente Pedlar *et al.*, 2012
Traducción libre

A pesar de los beneficios potenciales que la reubicación controlada podría generar en los ecosistemas forestales, hay aún un fuerte debate acerca de los factores éticos, económicos, legales, políticos y ecológicos que esta medida implica. La incertidumbre de los riesgos y los resultados que esta medida podría ocasionar impiden que se alcance un consenso para su implementación (Williams y Dumroese, 2013). Sin embargo, es necesario desarrollar las directrices y regulaciones de esta medida puesto que actualmente ya hay casos documentados de la reubicación de especies forestales, como la torrey de Florida, que ponen en evidencia la necesidad de alcanzar un acuerdo entre los diferentes tomadores de decisiones para desarrollar el marco de aplicación adecuado para la reubicación controlada de especies.

3.1 El caso de la Torreya de Florida (*Torreya taxifolia*)

El caso más conocido de la reubicación controlada de una especie forestal es el de la torreya de Florida. Esta conífera actualmente se distribuye a lo largo de una pequeña parte del río Apalachicola en el norte de Florida y al sur de Georgia en Estados Unidos y es endémica de esta región (Figura 2) (Barlow y Martin, 2004). La especie se encuentra en peligro crítico, ya que a partir de 1950 sufrió una fuerte mortalidad, cuya causa aún no ha sido explicada, que causó una gran disminución del número de individuos (Barlow y Martin, 2004). Actualmente, se estima que hay menos de 1,000 individuos, su regeneración natural es casi nula y su población sigue disminuyendo (Schwartz, 2004).

Debido a la grave situación de la especie, el grupo de naturalistas, botánicos y ecologistas conocidos bajo el nombre de Guardianes de Torreya (www.torreyaguardians.org); considera que es necesario comenzar a intervenir para evitar su extinción, por lo que se han organizado para llevar a cabo la reubicación controlada de la especie en áreas más allá del norte de su distribución actual (Figura 3.1.1).

Los Guardianes de Torreya consideran que la reubicación controlada de la especie es altamente viable y justificable debido a diferentes razones. En primer lugar, el grupo piensa que esta estrategia es la única opción posible para evitar la extinción de la especie, consideran que este es el momento en el que se debe actuar ya que la torreya se encuentra en un estado vulnerable que podría agravarse debido al impacto del cambio climático (Barlow y Martin, 2004). En segundo lugar, el registro fósil ha

revelado que la torreyea de Florida en el pasado, particularmente durante el cretácico superior, se encontraba en regiones más al norte de su distribución actual, por lo que probablemente esté mejor adaptada a climas más fríos y a través de la intervención humana se ayudaría a “repatriar” a la especie hacia estas zonas (Barlow y Martin, 2004). En tercer lugar, la capacidad de dispersión de la especie no le ha permitido establecerse en zonas cuyas condiciones climáticas son favorables para su subsistencia actualmente (Schwartz, 2004), lo que la hace una candidata adecuada para la implementación de la reubicación controlada. En cuarto lugar, la reubicación de la torreyea de Florida es viable económica y operacionalmente en comparación con los programas gubernamentales de recuperación de especies que suelen tener un alto perfil y un alto costo (Barlow y Martin, 2004). Además, la reubicación controlada es legal, ya que a pesar de ser una especie protegida por el gobierno de Estados Unidos y catalogada en peligro de extinción, la puesta en práctica de esta estrategia no implica ninguna violación a las leyes siempre y cuando las semillas sean legalmente adquiridas y sembradas en terrenos privados, con la autorización del propietario (McLachlan *et al.*, 2007). Por último, aunque el mayor riesgo ecológico que la reubicación controlada implica es que las especies reubicadas se vuelvan invasoras en los ecosistemas receptores, las características propias de la torreyea sugieren que es poco probable que esto suceda (Schwartz, 2004).



Figura 3.1.1. En la parte superior una foto de una plántula de la Torreya de Florida. En la imagen inferior se puede observar el área de distribución actual (verde) y el sitio en el que fue llevado a cabo la reubicación controlada de las 31 plántulas de la especie en el 2008.

Fuente: Modificada de Schwartz *et al.*, 2012
Traducción libre

atención de diversos científicos y que es abordado frecuentemente en el debate de la reubicación controlada como estrategia de conservación (McLachlan *et al.*, 2007; Schwartz *et al.*, 2012). Las principales críticas hacen referencia a la falta de bases científicas para justificar esta acción (Schwartz, 2004; Schwartz *et al.*, 2012). Por ejemplo, el grupo asume que el clima es el principal factor limitante para el establecimiento de la especie, sin tener la información suficiente para respaldar este supuesto (Schwartz, 2004). Asimismo, hay otras alternativas para su conservación que aún no han sido aprovechadas, por ejemplo el aumento de la población actual a través

Basándose en las razones y justificaciones previamente mencionadas, los Guardianes de Torreya comenzaron en el 2008 la reubicación de la especie. La medida fue implementada a través de la propagación de 31 plántulas, que fueron sembradas al sur de los montes Apalaches en el estado de Carolina del Norte, cuyo desempeño está siendo monitoreado también por el grupo (Figura 2) (Barlow, 2010).

La reubicación de la torreya de Florida ha sido un tema controvertido que ha acaparado la

del uso del germoplasma forestal disponible en jardines botánicos (Schwartz, 2004). Muchos autores coinciden en que la reubicación controlada debería ser utilizada únicamente cuando una especie se encuentra bajo el riesgo inminente de extinción y como la última opción para asegurar su existencia (Schwartz, 2004; Schwartz *et al.*, 2012).

Si la reubicación controlada de especies será realizada con el propósito de favorecer la conservación, entonces es necesario tener una dirección clara sobre cuando la acción está fundamentada y cuando no lo está (Schwartz, 2004). El caso de la torreya de Florida pone en evidencia la necesidad de establecer los puntos clave que deben ser incluidos en el desarrollo de políticas sólidas que permitan adoptar las mejores prácticas para la implementación de la reubicación controlada (Schwartz *et al.*, 2012).

3.2 Herramientas para la reubicación controlada de especies forestales

3.2.1 Modelos de distribución

Los modelos de distribución de especies son la principal herramienta para desarrollar estrategias de adaptación efectivas ante el cambio climático y por lo tanto son necesarios para la aplicación adecuada de la reubicación controlada (Morin y Thuiller, 2009). Estos modelos permiten hacer proyecciones de los cambios del hábitat potencial de las especies de árboles en el futuro bajo diferentes escenarios del cambio climático. Los métodos han sido mejorados recientemente por lo que sus proyecciones son más precisas hoy en día, sin embargo, también tienen sus limitaciones por lo que

es necesario utilizar además otras herramientas para complementar la información que éstos brindan (Iverson y McKenzie, 2013).

Los modelos utilizados para la predicción de los cambios en la vegetación se dividen en dos categorías principales: los modelos basados en los procesos ecológicos y los modelos de envoltura climática, también conocidos con el nombre de modelos de nicho (Iverson y McKenzie, 2013). Estos modelos permiten identificar las áreas de distribución vulnerables al cambio climático, cuyas condiciones se volverán desfavorables para la subsistencia de las especies y al mismo tiempo permiten detectar las zonas en donde el hábitat se volverá favorable para su establecimiento. A pesar de que ambos modelos tienen enfoques diferentes, sus resultados pueden ser complementarios y dan lugar además a proyecciones más robustas acerca de los cambios potenciales de la distribución de las especies (Morin y Thuiller, 2009).

3.2.2 Los bancos de semillas

Los bancos de semillas pueden ser una herramienta muy útil para la reubicación de las especies forestales. A través de la colecta de semillas de las poblaciones naturales de los árboles, a lo largo de toda su área de distribución, se puede mantener una representación adecuada de la diversidad genética natural de las especies en los bancos de semillas (Vitt *et al.*, 2010). Esta herramienta es el preámbulo para la aplicación de la reubicación controlada, puesto que es esencial coleccionar y almacenar las semillas que en el futuro podrán ser utilizadas en la aplicación de la reubicación controlada para evitar el riesgo de no tenerlas disponibles en el futuro.

Actualmente, hay propuestas que buscan poner en marcha estrategias para dirigir los objetivos de la recolección de semillas y de los bancos de semillas para su uso en la reubicación controlada (Vitt *et al.*, 2010). Las predicciones del cambio climático, así como las amenazas actuales sobre las especies, muestran que es necesario prepararse para la reubicación controlada de las especies, por lo que es necesario aumentar los esfuerzos y desarrollar los criterios para priorizar a las especies más vulnerables y así evitar la pérdida de diversidad vegetal en el futuro (Vitt *et al.*, 2010). Sin embargo, es importante considerar que no todas las especies presentan las características adecuadas para ser almacenadas, ya que poseen semillas recalcitrantes (Vitt *et al.*, 2010). También, hay especies cuyas semillas no pueden ser almacenadas durante largos períodos de tiempo, como es el caso del 14% de las especies arbóreas nativas de Canadá, entre las que se encuentran los encinos (*Quercus* spp.) y el nogal blanco americano (*Juglans cinerea*) (Pedlar *et al.*, 2012).

Aunque la reubicación controlada no ha sido completamente aceptada y su aplicación es aún tema de debate, la creación de bancos de semillas es una medida que nos permite anticiparnos a su implementación y que nos permite asegurarnos de tener disponibles los elementos necesarios para llevarla a cabo cuando sea el momento propicio.

3.2.3 Estudios demográficos y monitoreo de especies

Los estudios demográficos y el monitoreo de las especies en sus ambientes naturales nos permiten estudiar como los cambios en las condiciones climáticas les afectan y también cómo se adaptan (Vitt *et al.*, 2010; Iverson y McKenzie, 2013). Estos

estudios brindan la información necesaria para conocer la biología de las especies e identificar qué características del hábitat son las que determinarán el éxito de su establecimiento en nuevos ecosistemas en caso de ser reubicadas (Vitt *et al.*, 2010).

Asimismo, la información de estos trabajos permite distinguir qué especies podrían ser agresivas y volverse invasoras si son reubicadas (Vitt *et al.*, 2010). Para poder asegurar el éxito de la reubicación controlada y mejorar las predicciones de los modelos de distribución es necesario conocer cómo otros factores de tipo no climáticos influyen en su desempeño, tales como la competencia, su vulnerabilidad a los disturbios naturales y las características de sus ciclos de vida, entre otros (Iverson y McKenzie, 2013).

3.2.4 Marcos de decisión para la reubicación de especies

Se han desarrollado diferentes marcos de decisión cuyo objetivo es orientar la aplicación de las acciones de conservación para las especies ante la amenaza del cambio climático. A través de éstos, es posible recomendar bajo qué circunstancias deben ser aplicadas las diferentes estrategias de conservación disponibles.

En el trabajo de Hoegh-Guldberg *et al.* (2008), se propone un marco de decisión lineal cuyo enfoque está basado principalmente en los factores biológicos implicados (Figura 3.2.4.1). Este marco de decisión sirve para orientar la manera de proceder según el nivel de riesgo en el que las especies se encuentran. En este caso, la aplicación de la reubicación controlada es recomendada cuando los niveles de extinción son elevados, cuando es viable operacionalmente y cuando se prevé que los

(2008). Por ejemplo, el marco de decisión propuesto por Richardson *et al.*, (2009) está basado en un análisis multidimensional cuyo criterio está compuesto por 4 clases de categorías que comprenden los impactos de la realización (o no realización) de la reubicación controlada en un ámbito dado, los impactos de las actividades de la reubicación controlada en el ecosistema receptor, la viabilidad práctica de la ejecución de la reubicación controlada y la aceptabilidad social. Dentro de cada categoría se establecen una serie de atributos que deberán ser ponderados con la finalidad de asignarles un valor a cada una de estas categorías. En conjunto, los resultados de las 4 categorías permiten revelar los riesgos y beneficios netos de la aplicación de la reubicación controlada. De manera gráfica se puede apreciar en la Figura 3.2.4.2, las cuatro categorías de esta herramienta, en donde dos de los ejes reflejan los riesgos (impacto focal e impacto colateral) y los otros dos las principales limitaciones (aceptabilidad y viabilidad) asociadas con la aplicación de la reubicación controlada.

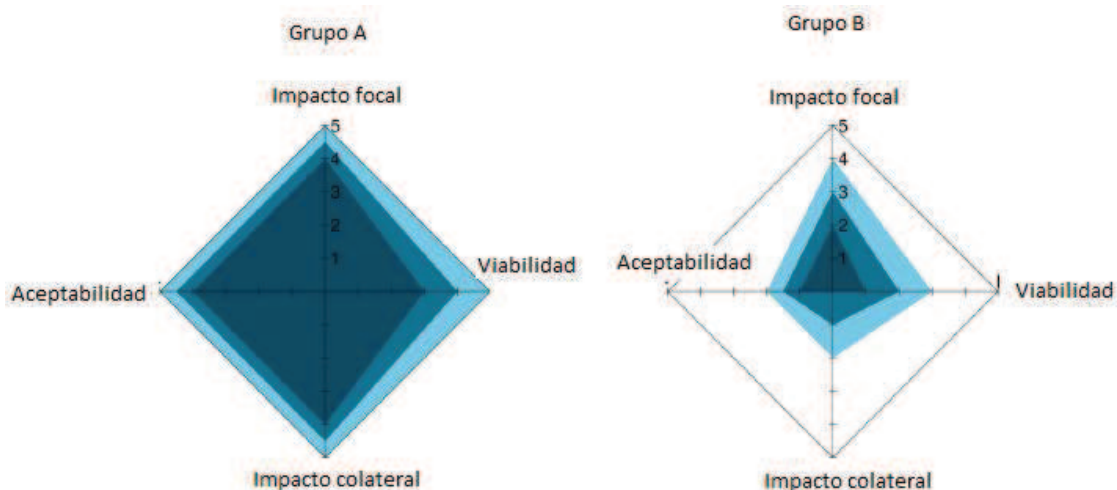


Figura 3.2.3.2. Representación del marco de decisión multidimensional propuesto por Richardson *et al.*, (2009). La escala de los ejes es de 0-5, siendo 0 el valor más bajo, sólo en el eje de impacto colateral la escala se invierte siendo 5 el valor más bajo. El polígono con la tonalidad intermedia corresponde al valor promedio de la categoría, los polígonos más claros y oscuros corresponden al límite inferior y superior de la estimación del promedio. En este caso se evaluó hipotéticamente la reubicación controlada de la torreya de Florida por dos grupos de

tomadores de decisiones (A y B) y se hizo para mostrar como dos grupos diferentes pueden llegar a diferentes conclusiones acerca de la reubicación controlada incluso teniendo la misma información.

Fuente: Modificado de Richardson *et al.*, 2009

Traducción libre

Los diferentes marcos de decisión ponen en evidencia los múltiples factores y escenarios a los que deben enfrentarse los tomadores de decisiones y muestran que la aplicación de la reubicación controlada no debe estar basada únicamente en la información biológica sino que también deben ser incluidos factores de otro tipo, tales como los sociales y económicos (Richardson *et al.*, 2009). Asimismo, el desarrollo de este tipo de herramientas contribuye para la creación de políticas y directrices en torno a la aplicación de la reubicación controlada.

3.3 Recomendaciones para la implementación de la reubicación controlada de especies forestales: El caso del álamo temblón (*Populus tremuloides*)

Actualmente, ya hay algunos estudios cuyo objetivo ha sido evaluar la reubicación controlada de una especie y que han generado recomendaciones para decidir cuándo debe ser puesta en práctica. Por ejemplo en el trabajo de Gray *et al.*, (2011) se propone un método en el que deben ser cumplidas tres condiciones para poder decidir si es necesario reubicar a una especie, éstas son: demostrar que hay evidencia de un desajuste de la adaptación de la especie al clima, debe haber una evaluación del impacto biológico del cambio climático sobre la especie y deben ser utilizadas proyecciones robustas de la distribución potencial de la especie en el futuro para así orientar los esfuerzos de la reubicación controlada. Los autores ilustraron este

método utilizando el caso del álamo temblón (*Populus tremuloides*), en las provincias de Alberta, Columbia Británica y Saskatchewan, al oeste de Canadá, en donde este árbol es la especie dominante del bosque deceduo de esta región.

Primero, estudiaron las diferencias genéticas regionales del álamo temblón a través de una serie de experimentos de trasplatación de plántulas entre los principales tipos de ecosistemas de las tres provincias. El objetivo era evaluar el desempeño de las plántulas, al ser trasplataadas a regiones a las que no están adaptadas, durante el periodo de 1998 a 2006. También la productividad del bosque fue estimada a través de un sistema de teledetección y fue analizada durante el periodo de 2001 a 2006 para evaluar la vulnerabilidad de las poblaciones del álamo temblón al cambio climático. Por último, fue utilizado un modelo de envoltura climática, también conocido como modelo de nicho, para proyectar el hábitat potencial de la especie en el futuro bajo el efecto del cambio climático.

En general, los resultados mostraron que el desempeño de las plántulas fue mayor cuando las plántulas del sur de la zona de estudio fueron trasplataadas en las áreas al norte, estas observaciones sugieren un desajuste en cuanto a la adaptación de las plántulas del sur del área de estudio y las condiciones ambientales actuales. A través del sistema de teledetección se logró identificar las zonas en donde la productividad del bosque disminuyó y que son vulnerables al impacto del cambio climático. Por último, las proyecciones del modelo de envoltura climática pusieron en evidencia una probable pérdida del hábitat (en términos de clima) del álamo temblón en zonas donde actualmente es la especie dominante.

Los resultados del estudio, en conjunto con lo observado en trabajos precedentes, ponen en evidencia que para el álamo temblón es recomendable la aplicación de la reubicación controlada como estrategia de adaptación al cambio climático. Asimismo, además de la evidencia biológica, la implementación de esta estrategia es viable económica y operacionalmente puesto que puede ser aplicada a través de los programas de reforestación existentes en la región. Por otro lado, la mayor aportación del estudio es el marco de aplicación desarrollado para dirigir los esfuerzos de la reubicación controlada utilizando diferentes herramientas y fuentes de información para reunir la mayor información disponible y decidir cuando esta estrategia debe ser aplicada.

Capítulo 4. Análisis de la reubicación controlada de especies forestales en el bosque templado de América del Norte como estrategia de conservación

4.1 Potencial de la reubicación controlada en América del Norte

En los bosques templados de América del Norte, se espera que las especies de árboles que tengan una amplia distribución geográfica, con poblaciones grandes y con alta fecundidad logren enfrentar exitosamente los cambios en las condiciones ambientales a través de la adaptación y la migración (Aitken *et al.*, 2008). Sin embargo, aquellas especies cuyas características particulares sugieren un bajo potencial de adaptación, tales como tamaños poblacionales pequeños, baja fecundidad, baja variación genética, tasas de migración lentas y tiempos de generación largos, probablemente estarán sujetas a un alto riesgo de extinción. Por lo que la reubicación controlada podría representar una estrategia de conservación para asegurar su

permanencia (Aitken *et al.*, 2008). Sobre todo en esta región que posee una gran extensión de bosques y que presenta además una importante industria forestal (Pedlar *et al.*, 2012).

4.2 La reubicación controlada y el manejo forestal en América del Norte

Como fue mencionado anteriormente, la reubicación controlada puede ser dirigida hacia las prácticas de manejo forestal. A pesar de que las plantaciones forestales difieren considerablemente de los bosques regenerados naturalmente, sobre todo en términos de conservación de biodiversidad, proporcionan servicios ecosistémicos que ayudan a evitar la erosión del suelo, suministran hábitats para la vida silvestre y contribuyen a la captura de carbono (Pedlar *et al.*, 2012).

Dado que en América del Norte hay un sector forestal importante, la aplicación de la reubicación controlada tiene el potencial de ser incorporada al manejo forestal de la región con la finalidad de asegurar que las plantaciones forestales estarán climáticamente adaptadas a los cambios de las condiciones climáticas en el futuro. A lo largo de Estados Unidos y Canadá hay cerca de 500 millones de hectáreas que están destinadas para el aprovechamiento forestal, mientras que en México se estima que hay alrededor de 15 millones de hectáreas de bosques templados que pueden ser utilizadas potencialmente para la producción sostenible de madera (CCA, 1997; FAO, 2004; Pedlar *et al.*, 2012).

4.2.1 Argumentos a favor de su aplicación

La implementación de la reubicación de especies en el manejo forestal está considerada como menos arriesgada en comparación con aquella que va dirigida hacia el “rescate de especies” (Pedlar *et al.*, 2012). Dado que esta estrategia consiste principalmente en trasladar las semillas de diferentes regiones hacia otras zonas dentro de la misma área de distribución de la especie, por lo que no se estaría corriendo el riesgo de introducir una especie exótica en el ecosistema receptor (Figura 4.2.1.1). Esto es posible gracias a la variabilidad genética que hay en las poblaciones de las especies arbóreas. Además, las especies utilizadas en las plantaciones forestales suelen tener una amplia distribución geográfica y debido a su valor económico han sido estudiadas a detalle, por lo que hay una considerable cantidad de información disponible acerca de sus características, diversidad genética, requerimientos del hábitat y sobre cómo están adaptadas a sus ambientes locales (Gray *et al.*, 2011; Pedlar *et al.*, 2012). Es importante resaltar que solamente en los sitios cercanos al límite norte de su distribución sería necesario reubicar a las especies arbóreas en zonas fuera de su distribución actual (Pedlar *et al.*, 2012).

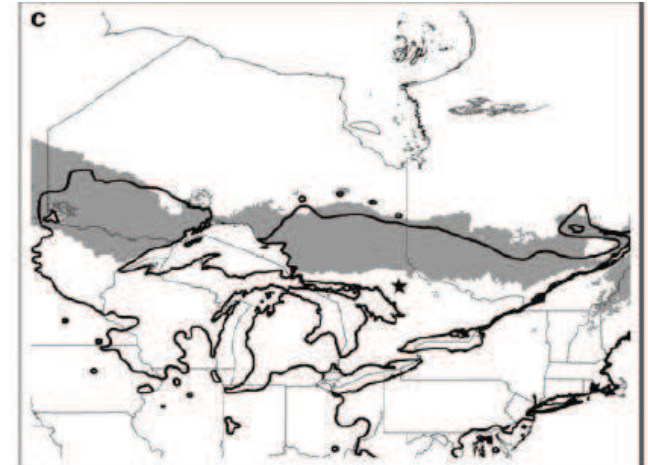
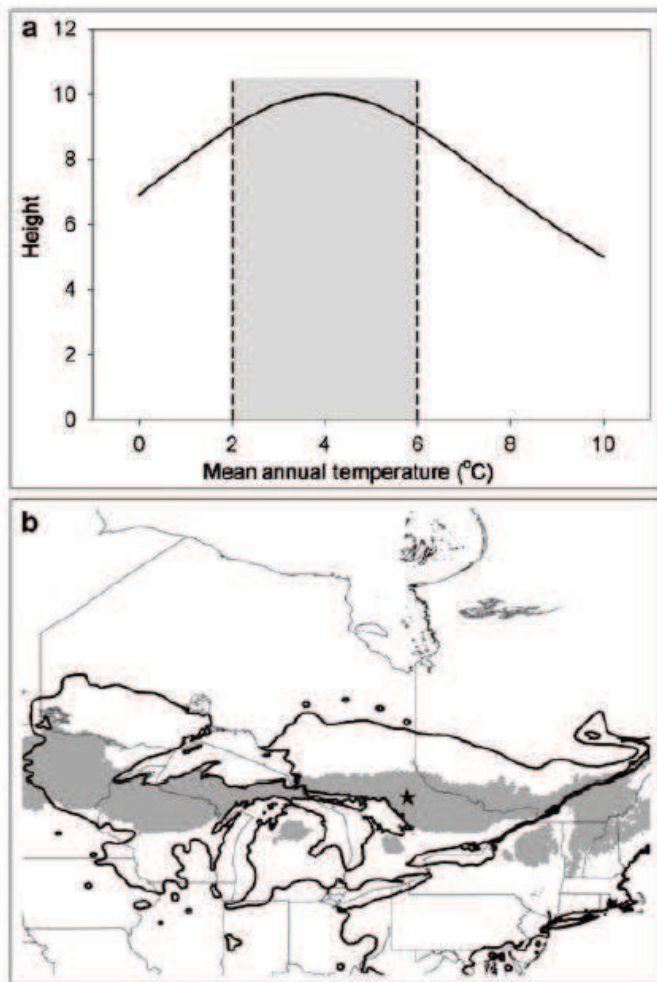


Figura 4.2.1.1. a) Relación entre la temperatura media anual (grados Celsius) y el crecimiento en altura (metros) para una población hipotética de pino blanco (*Pinus strobus*) en el norte de Ontario (señalada con una estrella negra en las imágenes [b] y [c]). En la imagen la parte sombreada en gris, entre las líneas verticales, representa el intervalo de temperatura en el cual la población tiene una alta tasa de crecimiento. b) La parte sombreada en gris muestra el hábitat de la especie para las semillas provenientes de esa población en ausencia del cambio climático. c) La parte sombreada representa la proyección del hábitat para el período 2041-2070 basado en la versión 3.1 del modelo canadiense de circulación general y el escenario A2 de emisiones. Las líneas negras en los paneles (b) y (c) indican los límites de la distribución del pino blanco. La mayor parte de su futuro hábitat cae dentro de los límites actuales del área de distribución.

Fuente: Modificado de Pedlar *et al.*, 2012

Los riesgos ecológicos así como los económicos aumentan con la distancia a la que deberán ser reubicadas las especies (Williams y Dumroese, 2013). Las distancias propuestas para la reubicación controlada en el manejo forestal son menores en comparación con aquellas necesarias para el “rescate de especies”. Por ejemplo, en el caso de la *Torreya* de Florida, un ejemplo de reubicación controlada dirigido para evitar la extinción de la especie, se requirió un traslado de más de 500 km fuera de su área de distribución actual (McLachlan *et al.*, 2007). Mientras que las distancias necesarias para reubicar a las especies de las plantaciones forestales implican aumentos de hasta

200 m en elevación y longitudinalmente son trasladadas hasta 2° más al norte. Estas distancias fueron propuestas para algunas especies que corresponden al bosque templado en Columbia Británica, en donde se han modificado las normas de los programas de reforestación y de manejo sustentable. Entre las especies para las que fue propuesta esta reubicación controlada están el abeto subalpino (*Abies lassicarpa*), el cedro rojo occidental (*Thuja pliccata*) y el ciprés amarillo (*Chamaecyparis nootkatensis*) (O'Neill *et al.*, 2008).

Asimismo, a nivel operacional es altamente viable incluir la reubicación controlada en el manejo forestal, ya que la investigación y el desarrollo de este sector proporcionan actualmente una gran cantidad de información que es relevante para la aplicación de esta estrategia. Para las especies comerciales de muchas regiones, su desempeño ha sido evaluado a través de ensayos de procedencia, que consisten en trasplantar individuos de distintas poblaciones a lo largo de diferentes sitios de prueba con la finalidad de identificar aquellas cuyo rendimiento es mayor en las localidades de ensayo (Pedlar *et al.*, 2012; Williams y Dumroese, 2013).

4.2.2 Riesgos y desventajas de su aplicación

Una de las principales barreras para la aplicación de la reubicación controlada en las prácticas forestales es que esta estrategia podría llegar a enfocarse más en evitar las pérdidas económicas en lugar de dirigir los esfuerzos hacia la conservación de especies (Williams y Dumroese, 2013). Además, de que serían favorecidas particularmente las especies de valor comercial, lo cual pondría en desventaja a aquellas que no son valiosas para el sector forestal (Pedlar *et al.*, 2012).

Igualmente, existe el riesgo de que las especies o poblaciones sean reubicadas antes de que el ecosistema receptor presente las características adecuadas para su establecimiento (Williams y Dumroese, 2013). También es posible que las condiciones del hábitat de la fuente de la semilla no coincidan con el sitio en el que será reubicada, lo que podría impedir que se establezca exitosamente (Williams y Dumroese, 2013). Estos riesgos potenciales podrían tener graves consecuencias debido al alcance que tienen las plantaciones forestales a lo largo de grandes extensiones. Por ejemplo, en el pasado durante los programas de reforestación implementados en los bosques de Landas en Francia se utilizaron semillas de las poblaciones ibéricas, provenientes de Portugal, del pino marítimo (*Pinus pinaster*). Las poblaciones de esta especie presentan altos niveles de diferenciación genética, de plasticidad fenotípica y diferentes rasgos adaptativos locales a lo largo de su área de distribución, por ejemplo las poblaciones al sur, como las ibéricas, están mejor adaptadas a las sequías que aquellas localizadas al norte del área de distribución (Benito-Garzón *et al.*, 2013). La utilización de las semillas de las poblaciones ibéricas en Francia implicaba una pequeña transición entre regiones climáticas adyacentes, sin embargo, la región a la cual fueron trasladadas presentaba una fuerte variabilidad en el clima caracterizada por la ocurrencia de fuertes heladas. El desempeño de los pinos marítimos provenientes de las poblaciones ibéricas reveló que éstas presentaban una mayor sensibilidad a las heladas. Debido a esto se registró una alta mortalidad de pinos marítimos durante los años en los que fueron registradas épocas de fuertes heladas, lo que ocasionó grandes pérdidas económicas, ya que fueron afectadas entre 300 y 400km² de plantaciones forestales (Benito-Garzón *et al.*, 2013).

Casos como el del pino marítimo en Francia ponen en evidencia el hecho de que a pesar de conocer las características de las especies arbóreas comerciales, es necesario evaluar el desempeño de las poblaciones reubicadas a largo plazo, para conocer cómo responden éstas a las condiciones del sitio al que sean trasladadas e implementar planes de manejo alternativos en caso de que su establecimiento se va obstaculizado (Benito-Garzón *et al.*, 2013). En la figura 4.2.2.1 se presentan algunos de los posibles casos que podrían ocurrir cuando es aplicada la reubicación controlada así como las posibles acciones a implementar.

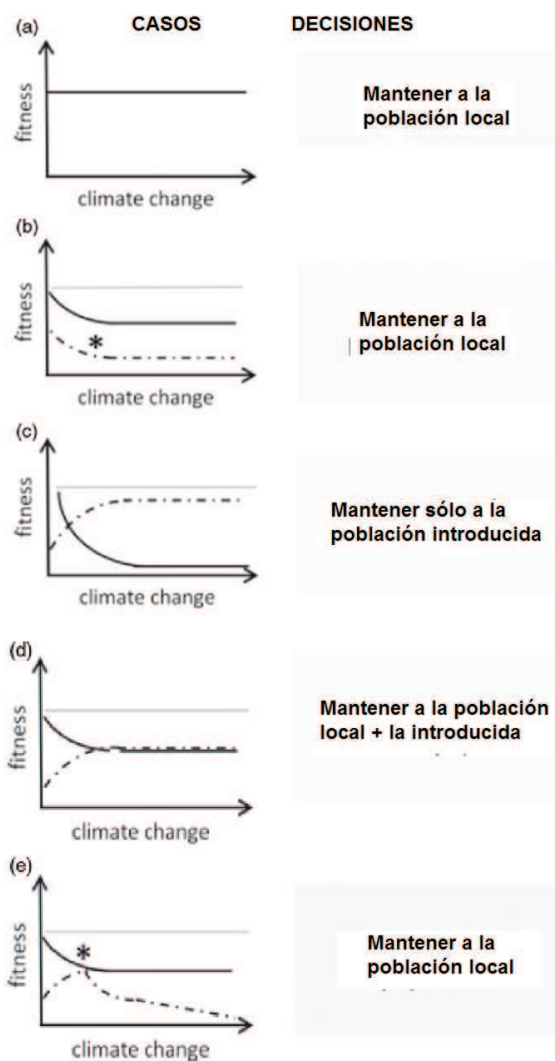


Figura 4.2.2.1. Posibles casos y decisiones a tomar cuando se lleva a cabo el traslado de poblaciones con el objetivo de adaptar los hábitats gestionados al cambio climático. La decisión inicial del traslado de especies está basada en la información recopilada a lo largo de ensayos de campo y/o simulaciones, seguidas por el monitoreo para detectar la falta de adaptación. Casos (a), (b), (c), (d), y (e) representan las posibilidades de adaptación de las poblaciones locales (línea continua) y las poblaciones introducidas (línea punteada) bajo el escenario del cambio climático en relación al caso (a) (línea gris). Caso (e) corresponde a *Pinus pinaster* en el cual la falta de adaptación fue sólo aparente en consecuencia a la incidencia de eventos extremos inesperados. El asterisco indica el tiempo de una posible alerta temprana.

Modificado de: Benito-Garzón *et al.*, 2013
Traducción libre

4.2.3 Ensayo sobre la adaptación de la migración asistida en Columbia Británica

Actualmente, a través de una iniciativa del Ministerio de Bosques, Tierras y Operación de los Recursos Naturales de la provincia de Columbia Británica, en Canadá, en conjunto con otros colaboradores, como el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, se está llevando a cabo un ensayo para estudiar a largo plazo la tolerancia climática de diferentes especies arbóreas de valor comercial (Marris, 2009). El objetivo del ensayo sobre la adaptación de la migración asistida, que en inglés es

conocido bajo el nombre de *Assisted Migration Adaptation Trial*, es generar la información necesaria para poder guiar en el futuro la aplicación de la reubicación controlada en las prácticas de manejo forestal de la región.

De acuerdo con la página oficial del proyecto, se están estudiando 15 especies arbóreas de valor comercial, entre las cuales se encuentran algunas coníferas del bosque templado de esta región, tales como el abeto de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), el abeto amabilis (*Abies amabilis*), el cedro rojo occidental (*Thuja plicata*) y caducifolias como el álamo temblón (*Populus tremuloides*). Las plántulas de dichas especies fueron obtenidas a partir de 40 localidades y trasplantadas a lo largo de 48 sitios diferentes en una región que se extiende a lo largo del norte del estado de California, en Estados Unidos hasta el territorio de Yukón en Canadá (Marris, 2009). En el mapa de la figura 4.2.3.1 se pueden observar los sitios en donde fueron colectadas y aquellos en las que fueron sembradas.

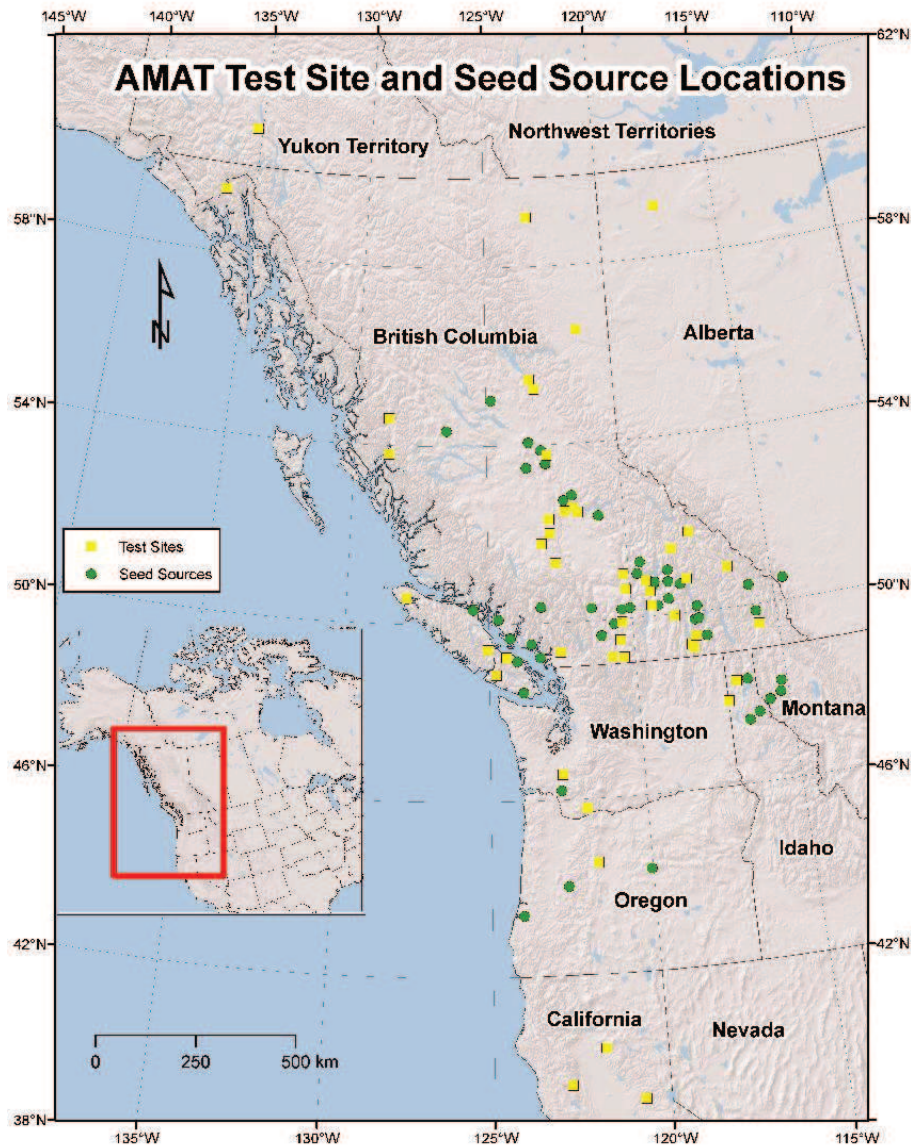


Figura 4.2.3.1. Localización de los sitios de colecta (verde) así como los sitios en donde han sido trasplantadas las especies (amarillo).

Fuente: Página web del *Assisted Migration Adaptation Trial* (<http://www.for.gov.bc.ca/hre/forgen/interior/AMAT.htm>)

Durante el período de 2009 a 2012 se comenzó con la trasplantación, por lo que se ha estado monitoreando el crecimiento y salud de las plántulas así como su relación con el clima. El objetivo principal es identificar de donde provienen las semillas que

estarán mejor adaptadas a las condiciones climáticas actuales y futuras. Esta información será utilizada para determinar los lineamientos de selección de semillas en Columbia Británica cuya finalidad es asegurar la máxima salud y productividad de las plantaciones forestales de la provincia ante el escenario del cambio climático (British Columbia, 2013).

La relevancia de esta iniciativa es que a través del desarrollo de este tipo de experimentos es posible anticiparse al impacto que tendrá el calentamiento global en las especies arbóreas de valor comercial. De esta manera se genera la información necesaria para una aplicación adecuada de la reubicación controlada para asegurar que se mantengan los servicios ecosistémicos proporcionados por las plantaciones forestales. Dado que éstas se extienden a lo largo de grandes superficies y representan una industria muy importante en la región, tan sólo en la provincia de Columbia Británica hay aproximadamente 25 millones de hectáreas que son aprovechadas para el manejo forestal (Marris, 2009).

4.3 El rescate de especies forestales a través de la reubicación controlada en América del Norte

La aplicación de la reubicación controlada de especies cuyo enfoque está dirigido hacia el “rescate” de éstas, es la que genera la mayor incertidumbre y controversia (Iverson *et al.*, 2013). Sin embargo, la extinción de especies es permanente e irreversible, por lo que bajo ciertas circunstancias cuando los beneficios de reubicar especies sean potencialmente mayores que los riesgos, entonces esta estrategia podría ofrecer la única opción viable para evitar su extinción (Sax *et al.*, 2009).

4.3.1 Argumentos a favor de su aplicación

Las proyecciones del cambio climático pronostican que el clima va a cambiar a una mayor velocidad que la que las especies arbóreas pueden adaptarse (Pedlar *et al.*, 2012). Por ejemplo, en respuesta a los cambios históricos del clima en el pasado, se observó que los árboles mostraron una tasa de migración relativamente lenta, cuya estimación es menor a 100 m por año (Aitken *et al.*, 2008). Sin embargo, los pronósticos actuales sugieren que para que las especies arbóreas logren mantenerse en los hábitats cuyas condiciones climáticas sean adecuadas para su existencia deberán migrar distancias de hasta 1,000 m al año o incluso mayores debido al cambio climático (Malcolm *et al.*, 2012). Asimismo, las tasas de migración para las especies arbóreas deberán ser mayores para aquellas que se encuentran en los ecosistemas templados y boreales en comparación con las que se encuentran en los trópicos (Malcolm *et al.*, 2012). En consecuencia, estas altas tasas de migración poseen el potencial de reducir la biodiversidad local si las especies no logran adecuarse a la misma velocidad a la que está previsto que el clima va a cambiar (Malcolm *et al.*, 2002). Las estimaciones fueron obtenidas a partir del uso de modelos de circulación general y modelos globales de vegetación para un escenario intermedio de emisiones de CO₂, en el que se asume una existencia del doble de dióxido de carbono atmosférico y un aumento de 2.5°C de temperatura a nivel global (Malcolm *et al.*, 2002).

En caso de que las especies arbóreas no logren establecerse exitosamente en nuevos hábitats probablemente habrá una menor cantidad de especies en las comunidades vegetales, una menor biomasa forestal y un incremento en la abundancia

de especies de sucesión temprana (Malcolm *et al.*, 2002). Asimismo, esto tendría un impacto en la composición y función de los ecosistemas, que no solamente afectarían a las especies vegetales, sino también a los animales y otros organismos que dependen de estos ecosistemas, ya que en muchos casos requieren de comunidades vegetales o especies particulares para su subsistencia (Malcolm *et al.*, 2002). Por ejemplo, en México la mariposa monarca (*Danaus plexippus*) depende de los bosques de oyamel (*Abies religiosa*), que es una conífera del bosque templado, para pasar el invierno en la región en la que se localiza la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. Sin embargo, está previsto que debido al cambio climático, particularmente un posible incremento en la temperatura de 3.7°C y una disminución de aproximadamente el 18.2% de la precipitación, las condiciones climáticas dentro de la reserva se volverán inadecuadas para la subsistencia del oyamel a fines de este siglo e incluso actualmente puede observarse una disminución de la salud de los oyameles que ahí se encuentran (Sáenz-Romero *et al.*, 2012). Estas estimaciones son preocupantes, puesto que la mariposa monarca se refugia exclusivamente en este tipo de árboles. Bajo estas circunstancias la aplicación de la reubicación controlada representa una estrategia viable para asegurar la permanencia del oyamel en mayores altitudes y también para evitar la pérdida de cobertura forestal y dentro de la reserva a través de la reubicación controlada de otras especies de coníferas, como el Pinabete de Nuevo León (*Picea martinezii*) o el Pino Blanco (*Pinus pseudostrobus*) (Sáenz-Romero *et al.*, 2012). En este caso, los pronósticos también revelan una rápida disminución del clima adecuado para el oyamel en la reserva, ya que se espera que para el 2030 alrededor del 69.2% de área no presente las condiciones adecuadas para su subsistencia, por lo que es

urgente comenzar a desarrollar las acciones necesarias para la aplicación de la reubicación controlada (Sáenz-Romero *et al.*, 2012).

Algunos autores insisten en que es urgente comenzar a actuar para prepararse al impacto del cambio climático, el retraso y la falta de iniciativas para prepararse no son una opción (Ledig *et al.*, 2010). Es probable que el incremento gradual del estrés al que están expuestas las especies arbóreas, como los periodos de sequía, eventualmente excedan los límites de la tolerancia fisiológica de las especies y entonces la producción de semillas sea insuficiente para el establecimiento de poblaciones *ex situ* (Ledig *et al.*, 2010).

El calentamiento global representa un gran desafío para todas las especies, pero sobre todo para aquellas especies cuya área de distribución es pequeña y se encuentra fragmentada en pequeñas poblaciones distantes entre sí (Ledig *et al.*, 2010). De hecho, está previsto que la fragmentación del paisaje limitará la capacidad de migración de las especies arbóreas (Pedlar *et al.*, 2012). Además, la población humana sigue creciendo lo que agrava la pérdida de hábitat para las especies (Schwartz *et al.*, 2012). Asimismo, las prácticas de conservación actuales pueden no ser suficientes para evitar la pérdida de especies debido al estado actual de los hábitats naturales y al deterioro que causan las actividades humanas (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2008). Por lo que la aplicación de la reubicación controlada es una estrategia que debe ser considerada para la adaptación y conservación de la biodiversidad forestal ante el cambio climático.

4.3.2 Riesgos y obstáculos para su aplicación

Como ha sido mencionado anteriormente, el principal riesgo que la aplicación de la reubicación controlada conlleva es que las especies reubicadas se conviertan en invasoras y que entonces puedan causar daños irreparables en los ecosistemas receptores, por ejemplo que causen la extinción de especies nativas (Ricciardi y Simberloff, 2009). No obstante, es poco probable que las especies de plantas reubicadas causen extinciones debido a diversas razones. Primero, las extinciones causadas por la invasión de especies exóticas ocurren principalmente en islas, aproximadamente el 90% (Sax *et al.*, 2009). Segundo, las extinciones generalmente son el resultado de la depredación y no de la competencia. También, en los últimos cien años, hay miles de plantas exóticas que han sido introducidas a islas de todo el mundo, pero pocas especies nativas se han extinguido debido a esto (Sax *et al.*, 2009).

De acuerdo con Kreyling *et al.* (2011), hay tres razones por las cuales la aplicación de la reubicación controlada puede no ser adecuada para las especies raras y en peligro de extinción, a pesar de que están consideradas como las más amenazadas por el cambio climático. La primera es que estas especies suelen requerir condiciones climáticas altamente específicas, lo que dificulta su reubicación hacia otros sitios cuyas características sean similares. En segundo lugar está la colecta del número suficiente de individuos sin dañar a las poblaciones locales de la especie. Por último, es probable que las poblaciones en declive hayan experimentado algún cuello de botella genético en el pasado y entonces las poblaciones restantes representen sólo una pequeña parte del acervo genético de la especie, lo que podría limitar su establecimiento en los sitios en los que sea reubicada. Debido a estas restricciones, la

reubicación controlada sería una opción viable solamente para un número limitado de especies amenazadas.

4.4 Estado actual de la aplicación de la reubicación controlada de especies forestales en América del Norte

En América del Norte los esfuerzos de la reubicación controlada han sido dirigidos principalmente hacia el aprovechamiento forestal, aunque también las iniciativas desarrolladas en los tres países difieren entre sí.

Es en Canadá en donde se ha fomentado mayormente su aplicación, entre las medidas adoptadas por este país, se puede mencionar que se han modificado las políticas de manejo forestal y se han generado herramientas para facilitar la aplicación de esta estrategia (Williams y Dumroese, 2013). Además del ensayo sobre la adaptación de la migración asistida en Columbia Británica, en esta provincia y en Alberta han sido modificados los lineamientos de transferencia de semillas para permitir que algunas especies sean sembradas a mayores latitudes y a mayores elevaciones. Mientras que en Quebec y en Ontario se están estudiando los límites al norte del área de distribución de las especies a través de la trasplatación de semillas provenientes del sur de su área de distribución a fin de evaluar su desempeño (Williams y Dumroese, 2013). Asimismo, cuentan con el Centro Nacional de Semillas de Árboles del Servicio Forestal Canadiense en donde se almacenan las semillas de una selección de especies arbóreas destinadas para ser utilizadas en los futuros esfuerzos de conservación (Pedlar *et al.*, 2012).

En Estados Unidos también se ha considerado emplear la reubicación controlada, sin embargo pocos planes han sido implementados o evaluados para su aplicación (Williams y Dumroese, 2013). Aunque también han sido desarrolladas herramientas para identificar a las especies arbóreas que en el futuro podrían estar fuertemente amenazadas por el cambio climático. Como ejemplo está el Atlas del Cambio Climático de Árboles creado por el Servicio Forestal y que genera proyecciones del hábitat adecuado, en términos de clima, para 134 especies de árboles del Este de Estados Unidos bajo diferentes escenarios del cambio climático (Landscape Change Research Group, 2014). Este tipo de herramientas permite evaluar la vulnerabilidad de las especies y esto a su vez permite desarrollar las estrategias de adaptación que son requeridas (Williams y Dumroese, 2013). Igualmente, el Servicio Forestal cuenta con el Centro Nacional de Semillas cuya función consiste en almacenar una diversa variedad de semillas de las especies nativas de ese país (Pedlar *et al.*, 2012).

En el caso de México, los esfuerzos hacia la aplicación de la reubicación controlada han consistido en el establecimiento en el año 2012 del Centro Nacional de Recursos Genéticos cuya finalidad es preservar los recursos genéticos de las especies nativas de México (SAGARPA, 2012). Está previsto que la colecta de germoplasma y el mejoramiento genético de las especies sea el preámbulo para el establecimiento de ensayos de la reubicación controlada de las especies (CONAFOR, 2014).

La reubicación controlada ha sido recomendada para diversas especies arbóreas de los bosques templados de América del Norte, como el álamo temblón en el oeste de Canadá (Gray *et al.*, 2011), el oyamel en el Cinturón Volcánico

Transmexicano (Sáenz-Romero *et al.*, 2012) y para el roble negro del Este (*Quercus velutina*) en el estado de Wisconsin, en Estados Unidos (Iverson *et al.*, 2013), entre otros. Es importante remarcar que debido a la importancia que el sector forestal tiene en Canadá y Estados Unidos, los principales esfuerzos de la reubicación controlada han sido dirigidos hacia las especies de valor comercial. Mientras que en México, la reubicación controlada está destinada hacia la conservación de las especies arbóreas de los bosques templados, debido a la alta diversidad de pinos y encinos presente en esta región (Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007).

4.5 Potencial de la aplicación de la reubicación controlada de especies forestales en América del Norte

Una gran parte de la investigación científica sobre el efecto del cambio climático en los sistemas naturales se ha realizado en los bosques templados de América del Norte, siendo los árboles el grupo taxonómico al que se ha estudiado principalmente (Felton *et al.*, 2009). Por lo que cada vez hay más información disponible que puede ser utilizada para definir los lineamientos adecuados para la aplicación de la reubicación controlada. Sin embargo, es necesario el desarrollo de marcos de toma de decisiones en donde sean incluidos los factores éticos, políticos, económicos y ecológicos que esta estrategia conlleva, en lugar de basarse únicamente en la evidencia ecológica (Schwartz *et al.*, 2012). El debate en torno a esta estrategia todavía está activo y además la literatura en torno al tema sigue aumentando, por lo que es de esperarse que las recomendaciones provenientes de estos trabajos permitan avanzar en la creación de normas, protocolos y directrices para poder evaluar cuándo, cómo y en beneficio de quien debería ser implementada la reubicación controlada (Hewitt *et al.*,

2011; Schwartz *et al.*, 2012). Asimismo, las iniciativas establecidas actualmente darán lugar a la creación de políticas más robustas que permitirán decidir bajo qué circunstancias deberá ser aplicada.

La cooperación internacional entre los tres países ofrece la oportunidad para trabajar en conjunto en aspectos no solamente relacionados con la reubicación de especies forestales, sino en el desarrollo de estrategias de adaptación al cambio climático que puedan ser aplicadas para los ecosistemas compartidos. Para la región de América del Norte existe la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) y la Comisión Forestal para América del Norte (COFAN), establecida por la Conferencia de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). El principal objetivo de ambos organismos es la conservación, protección y mejoramiento del medio ambiente en América del Norte.

Particularmente, la COFAN está enfocada al sector forestal, entre sus principales funciones está la creación de políticas forestales, apoyar actividades e intercambiar información científica y técnica de cuestiones forestales (COFAN, 2012). Dentro de esta comisión se encuentra el Grupo de Trabajo sobre Recursos Genéticos Forestales, que en los últimos años ha estado trabajando en el desarrollo de directrices para la reubicación controlada de especies y poblaciones forestales en respuesta al cambio climático. Como parte de los esfuerzos de este grupo de trabajo se han publicado diversos artículos relacionados con la aplicación de la reubicación controlada de especies arbóreas del bosque templado, como el de Castellanos-Acuña *et al.*, (2015), Sáenz-Romero *et al.*, (2012), entre otros.

Conclusión

La reubicación controlada de especies forestales es una estrategia que ofrece, a través de la intervención humana, contribuir a la adaptación de los bosques ante el inminente impacto del cambio climático. Los pronósticos actuales prevén cambios en las condiciones climáticas a una mayor velocidad que en el pasado, por lo que es probable que algunas especies no logren subsistir. Además, no es posible predecir con exactitud cómo es que responderán las especies a estas modificaciones. Asimismo, muchas especies están actualmente en un estado vulnerable debido a otras amenazas, como la pérdida del hábitat, las especies invasoras y la sobreexplotación, por lo que el cambio climático agravaría aún más su situación.

A pesar de la incertidumbre que hay en torno a las posibles consecuencias de esta estrategia, es necesario comenzar a prepararse para poder adoptar las medidas indispensables a fin de evitar la futura pérdida de especies, así como los servicios ecosistémicos que éstas proporcionan. La velocidad del cambio climático pone en evidencia que es inminente comenzar a actuar. La aplicación de la reubicación controlada en los bosques templados de América del Norte dependerá sobre todo del contexto particular de cada especie, ya que el impacto del cambio climático será diferente a lo largo de esta región.

Los avances en los modelos de distribución así como los estudios demográficos de las especies y el monitoreo de las poblaciones naturales han dado lugar al desarrollo de herramientas que contribuyen para dirigir los esfuerzos de la reubicación controlada. Dado que han permitido generar mejores pronósticos para identificar que

especies son las más amenazadas, así como determinar cuáles serían los riesgos y también los beneficios en caso de que fueran reubicadas. Aunque es probable que bajo ciertas circunstancias, deberá ser necesario tomar decisiones, incluso con información insuficiente. Sobre todo en situaciones en las cuales el peligro de no actuar supere a los riesgos que implica la aplicación de esta estrategia.

El debate en torno a la reubicación controlada continúa acaparando la atención no solamente del ámbito científico, sino también de los organismos gubernamentales de protección al ambiente y de los gestores de recursos naturales. La discusión en torno a este tema ha dado también lugar a adelantos en el desarrollo de marcos de aplicación que contribuirán en el futuro para la toma de decisiones y la creación de políticas para su aplicación.

En el caso de América del Norte, a pesar de que los esfuerzos y el enfoque han sido diferentes entre los tres países, se han establecido iniciativas que permitirán prepararse al impacto del cambio climático. En el caso de Estados Unidos y Canadá, hay mayor información disponible acerca del impacto que este fenómeno tendrá en sus ecosistemas forestales, esto se debe principalmente a la importancia que tiene el sector forestal en estos dos países. En México apenas se está generando la información necesaria y hay una menor cantidad de información disponible para las especies de los bosques templados. Sin embargo, los organismos de cooperación internacional entre los tres países ofrecen la oportunidad de trabajar de manera conjunta para el impulso de la aplicación de la reubicación controlada en los bosques templados.

Es recomendable continuar con los trabajos de investigación para conocer la biología de las especies forestales, así como mantener un monitoreo constante y hacer un seguimiento para identificar como los cambios en las condiciones climáticas les afectan. Asimismo, es esencial utilizar las herramientas actuales, como los modelos de distribución, para identificar oportunamente cuales especies estarán fuertemente amenazadas al impacto del cambio climático y poder así priorizar las acciones de conservación. Particularmente en México, esto es muy necesario ya que hay poca información disponible acerca de las especies forestales de los bosques templados y de los escenarios del cambio climático, a pesar de presentar una gran diversidad de especies. También, es necesario continuar con la puesta en marcha de experimentos de trasplante, tales como el *Assisted Migration Adaptation Trial*, para asegurar el establecimiento exitoso de las especies en los sitios en los que sean reubicadas. Igualmente, a pesar de la incertidumbre que la reubicación de especies conlleva es importante desarrollar políticas en cada país, que permitan dirigir este tipo de acciones con la finalidad de crear un marco de aplicación adecuado y prevenir las consecuencias negativas potenciales.

Además de la reubicación controlada, la aplicación oportuna de las estrategias de conservación convencionales, tales como la restauración ecológica y el aumento de la conectividad ecológica, contribuyen también para evitar la pérdida de especies. Por lo que los esfuerzos de conservación deben enfocarse en la aplicación de múltiples estrategias para asegurar la permanencia de las especies y poder tener mejores resultados.

Referencias

- Aitken, S.N., Yeaman S., Holliday, J.A., Wang T., Curtis-McLane, S., 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*, 1(1), pp. 95-111.
- Barlow, C., Martin, P.S., 2004. Bring *Torreya taxifolia* North-Now. *Wild Earth Forum*, pp. 52-54. [en línea] Disponible en: < <http://www.torreyaguardians.org/barlow-martin.pdf> > [Acceso 10 Marzo 2015]
- Beaubien, E.G., Hall-Beyer, M. 2003. Plant phenology in western Canada: Trends and Links to the view from space. *Environmental Monitoring and Assessment*, 88, pp. 419-429.
- Benito-Garzón, M., Ha.Duong, M., Frascaria-Lacoste, N., Fernández-Manjarrés, J, 2013. Habitat Restoration and Climate Change: Dealing with Climate Variability, Incomplete Data, and Management Decisions with Tree Translocations. *Restoration Ecology*, 21(5), pp. 530-536.
- Bonan, G., 2008., Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320, pp. 1444-1449.
- Boisvenu, C., Running, S.W., 2006. Impacts of climate change on natural forest productivity - evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology*, 12, pp. 862-882.
- Castellanos-Acuña, D., Lindig-Cisneros, R., Sáenz-Romero, C., 2015. Altitudinal assisted migration of Mexican pines as an adaptation to climate change. *Ecosphere*, 6(1), pp. 1-16.
- Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), 1997. *Regiones ecológicas de América del Norte, hacia una perspectiva común*. Montreal, Canadá, pp. 71.
- Challenger, A., y Soberón, J., 2008. Los ecosistemas terrestres, en Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Conabio, México, pp. 87-108.
- Chen, I-C., Hill J.K., Ohlemüller, R., Roy, D.B., Thomas, C.D., 2011. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*. 333, pp.1024-1026.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 2014. *El manejo de los recursos genéticos forestales* [en línea] Zapopan, Jalisco. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx/innovacion_forestal/?p=1007> [Acceso 24 Marzo 2015].
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 1999. *Forest management in temperate and boreal forests: current practices and the scope for*

the implementing sustainable forest management. Forestry Policy and Planning Division, Rome, pp. 1-3

- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2004. *Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020*. [en línea] Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/j2215s/j2215s00.pdf> [Acceso 20 Marzo 2015]
- Felton, A., Fischer, J., Lindenmayer, D.B., Montague-Drake, R., Lowe, A.R., Saunders, D., Felton, A.M., Steffen, W., Munro, N.T., Youngentob, K., Gillen, J., Gibbons, P., Bruzgul, J.E., Fazey, I., Bond, S.J., Elliott, P., Macdonald, B.C.T., Porfirio, L.L., Westgate, M., Worthy, M., 2009. Climate change, conservation and management: an assessment of the peer-reviewed scientific journal literature. *Biodiversity Conservation*, 18, pp. 2243-2253.
- Field, C.B., Mortsch, L.D., Brklacich, M., Forbes, D.L., Kovacs, P., Patz, J.A., Running S.W., Scott, M.J., 2007. *North America. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 617-652.
- Gonzalez, P., Neilson, R. P., Lenihan, J.M., Drapek, R. J., 2010. Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 19(6), pp. 755–768
- Gómez Díaz, .J.D., Monterroso Rivas, A.I., Tinoco Rueda, J.A., Toledo Medrano, M.L., 2011. Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera*, 24(1), pp. 31-52.
- Gómez-Mendoza, L., Arriaga, L., 2007. Modeling the Effect of Climate Change on the Distribution of Oak and Pine Species of Mexico. *Conservation Biology*, 21(6), pp. 1545-1555.
- Gray, L.K., Gylander, T., MBogga, S., Pei-yu, C., Hamann, A., 2011. Assisted migration to address climate change: recommendations for aspen reforestation in western Canada. *Ecological Applications*, 21(5), pp. 1591-1603.
- Hartmann, D.L., A.M.G. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Bronnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J., Dlugokencky, D.R. Easterling, A. Kaplan, B.J. Soden, P.W. Thorne, M. Wild and P.M. Zhai, 2013. Observations: Atmosphere and Surface. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K.Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Hewitt, N., Klenk, N., Smith, A.L., Bazely, D.R., Yan, N., Wood, S., MacLellan, J.I., Lipsig-Mumme, C., Henriques, I., 2011. Taking stock of the assisted migration debate. *Biological Conservation*, 144, pp. 2560-2572.
- Hoegh-Guldberg, O., Hughes, L., McIntyre, S., Lindenmayer, D.B., Parmesan, C., Possingham, H.P., Thomas, C.D., 2008. Assisted Colonization and Rapid Climate Change. *Science*, 321, pp. 345-346
- Houle, D., Bouffard, A., Duchesne, L., Logan, T., Harvey, R., 2012. Projections of Future Soil Temperature and Water Content for Three Quebec Forested Sites. *Journal of Climate*, 25(21), pp. 7690-7701.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-27
- IUCN (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources), 2007. *Habitats Classification Scheme (Version 3.0)*. [en línea] Disponible en: < http://www.iucnredlist.org/documents/June_2012_Guidance_Habitats_Classification_Scheme.pdf > [Acceso 09 Enero 2015]
- Iverson, R.L., McKenzie, D., 2013. Tree-species range shifts in a changing climate: detecting, modeling, assisting. *Landscape Ecology*, 28, pp. 879-889.
- Iverson, L.R., Peters, M.P., Matthews, S., Prasad, A., 2013. An overview of some concepts, potentials, issues, and realities of assisted migration for climate change adaptation in forests. In: Browning, J.; Palacios, P., comps. *Proceedings of the 60th Annual Western International Forest Disease Work Conference*. Tahoe City, California 8-12 Oct. 2012. s.n.
- Iverson, R.L., Prasad, A., Matthews, S., 2008. Modeling potential climate change impact on the trees of the northeastern United States. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 13, pp. 487-516
- Jeffery, S.B., Masters, G.J., Hodkinson, I.D., Awmack, C., Bezemer, T.M., Brown, V.K., Butterfield, J., Buse, A., Coulson, J.C., Farrar, J. Good, J.E.G., Harrington, R., Hartley, S., Jones, T.H., Lindroth, R.L., Press, M.C., Symrnioudis, I., Watt, A.D., Whittaker, J.B., 2002. Herbivory in global climate change research : direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change biology*. 8(1), pp. 1-16.
- Kreyling, J., Bittner, T., Jaeschke, A., Jentsch, A., Steinbauer, M.J., Thiel, D., Beierkuhnlein, C., 2011. Assisted Colonization: A Question of Focal Units and Recipient Localities. *Restoration Ecology*, 19(4), pp. 433-440.

- Lafleur, B., Paré, D., Munson, Alison D., Bergeron Y., 2010. Response of northeastern North American forests to climate change: Will soil conditions constrain tree species migration? *Environmental Reviews*, 18, pp. 279-289
- Landscape Change Research Group. 2014. *Climate change atlas*. [en línea] Disponible en: <<http://www.nrs.fs.fed.us/atlas>> [Acceso 20 Marzo 2015]
- Ledig, T.F., Rehfeldt, G.E., Sáenz-Romero, C., Flores-López, C., 2010. Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. *American Journal of Botany*, 97(6), pp. 970-980
- Loarie, S.R., Duffy, P.B., Hamilton, H., Asner, G.P., Field, C.B., Ackerly, D.D., 2009. The velocity of climate change. *Nature*, 462, pp. 24-31
- Malcolm, J.R., Markham, A., Neilson, R.P., Garaci, M., 2002. Estimated migration rates under scenarios of global climate change. *Journal of Biogeography*, 29, pp. 8325-849.
- Marris, E., 2009. Planting the forest of the future. *Nature*. 459, pp.906-908
- McKenzie, D., Gedalof, Z., Peterson, D.L., Mote, P., 2004. Climatic Change, Wildfire, and Conservation. *Conservation Biology*. 18(4), pp. 890-902.
- McMahon, S.M., Parker, G.G., Miller, D.R., 2010. Evidence for a recent increase in forest growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(8), pp. 3611-3615.
- McLachlan, J.S., Hellmann, J.J., Schwartz, M.W., 2007. A Framework for Debate of Assisted Migration in an Era of Climate Change. *Conservation Biology*, 21(2), pp. 297-302.
- McMahon, S.M., Parker, G.G., Miller, D.R., 2010. Evidence for a recent increase in forest growth. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 107(8), pp. 3611-3615
- Morin, X., Viner, D., Chuine, I., 2008. Tree species range shifts at a continental scale: new predictive insights from a process-based model. *Journal of Ecology*. 96(4), pp. 784-794.
- Morin, X., Thuiller, W., 2009. Comparing niche- and process- based models to reduce prediction uncertainty in species range shifts under climate change. *Ecology*. 90. 1301-1313.
- Oren, R., Ellsworth, D.S., Johnsen, K.H., Phillips, N., Ewers, B.E., Maier, C., Schafer, K.V.R., McCarthy, H., Hendrey, G., McNulty, S.G., Katul, G.G., 2001. Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO²- enriched atmosphere. *Nature*, 411, pp. 469-472
- Parmesan, C. & Yohe, G., 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*. 421, pp. 37-42

- Pedlar J.H., Kenney, D.W., McKenney, I.A., Beardmore, T., Beaulieu, J., Iverson, L., O'Neill, G.A., Winder, R.S., Ste-Marie, C., 2012. Placing Forestry in the Assisted Migration Debate. *BioScience*, 62(9), pp. 835-842.
- Peters, E. B., Wythers, K.R., Zhang, S., Bradford, J.B., Reich, P.B., 2013. Potential climate change impacts on temperate forest ecosystem processes. *Canadian Journal of Forest Research*. 43(10), pp. 939-950.
- Peters, R.L., Darling, J.D.S., 1985. The Greenhouse Effect and Nature Reserves. *BioScience*. 35(11), pp. 707-717.
- Rehfeldt, G.E., Crookston, N.L., Sáenz-Romero, C., Campbell, E.M., 2012. North American vegetation model for land-use planning in a changing climate: a solution to large classification problems. *Ecological Applications*. 22(1), pp.119-141
- Ricciardi, A., Simberloff, D., 2009. Assisted colonization is not a viable conservation strategy. *Trends in Ecology and Evolution*, 24(5), pp. 248-253
- Richardson, D.M., Hellmann, J.J., McLachlan, J.S., Sax, D.F., Schwartz, M.W., Gonzalez, P., Brennan, E.J., Camacho, A., Root, T.L., Sala, O.E., Schneider, S.H., Ashe, D.M., Clark, J.R., Early, R., Etterson, J.R., Fielder, E.D., Gill, J.L., Minter, B.A., Polasky, S., Safford, H.D., Thompson, A.R., Vellend, M., 2009. Multidimensional evaluation of managed relocation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(24), pp. 9721-9724.
- Ricklefs, R.E., Miller, G.L., 1999. *Ecology*. W.H. Freeman, New York, pp. 161-164
- Romero-Lankao, P., J.B. Smith, D.J. Davidson, N.S. Diffenbaugh, P.L. Kinney, P. Kirshen, P. Kovacs, and L. Villers Ruiz., 2014. North America. en: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1439-1498.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G.E., Duval, P., Lindig-Cisneros, R.A., 2012. *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 275, pp. 98-106.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), 2012. *Centro Nacional de Recursos Genéticos* [en línea] México, D.F. Disponible en: < <http://www.inifap.gob.mx/SitePages/centros/cnrg.aspx>> [Acceso 24 Marzo 2015].
- Sanchez, O., Peters, E., Monroy-Vilchis, O., 2003. *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México*. INE, México, pp. 19-23.

- Savage, J., Vellend, M., 2014. Elevational shifts, biotic homogenization and time lags in vegetation change during 40 years of climate warming. *Ecography*, in press.
- Saxe, H., Cannell, M.G.R., Johnsen, O., Ryan, M.G., Vourlitis, G., 2000. Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist*, 149, 369-399
- SCDB (Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique), 2010. *La biodiversité forestière-Le trésor vivant de la planète*. Montréal, Québec, pp. 48.
- Schwartz, M.W., Hellmann, J.J., McLachlan, J.M., Sax, D.F., Borevitz, J.O., Brennan, J., Camacho, A.E., Ceballos, G., Clark, J.R., Doremus, H., Early, R., Etterson, J.R., Fielder, D., Gill, J.L., Gonzalez, P., Green, N., Hannah, L., Jamieson, D.W., Javeline, D., Minter, B.A., Odenbaugh, J., Polasky, S., Richardson, D.M., Root, T.L., Safford, H.D., Sala, O., Schneider, S.H., Thompson, A.R., Williams, J.W., Vellend, M., Vitt, P., Zellmer, S., 2012. Managed Relocation: Integrating the Scientific, Regulatory, and Ethical Challenges. *BioScience*, 62(8), pp. 732-743.
- Schwartz, M.W., 2004. Conservationists should not move *Torreya taxifolia*. Wild Earth Forum, pp. 1-4. [en línea] Disponible en: <<http://www.torreyguardians.org/schwartz.pdf>> [Acceso 10 Marzo 2015]
- Thompson, I., Mackey, B., McNulty, S., Mosseler, A., 2009. *Forest Resilience, Biodiversity, and Climate Change. A synthesis of the biodiversity/resilience/stability relationship in forest ecosystems*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal. Technical Series no. 43, pp.67.
- Urli, M., Delzon, S., Eyermann, A., Couallier, V., Garcia-Valdés, R., Zavala, M.A. & Porté, A. J., 2014. Inferring shifts in tree species distribution using asymmetric distribution curves: a case study in the Iberian mountains. *Journal of Vegetation Science*. 25(1), pp.147-159
- Vitt, P., Havens, K., Kramer, A.T., Sollenberger, D., Yates, E., 2010. Assisted migration of plants: Changes in latitudes, changes in attitudes. *Biological Conservation*, 143(1), pp. 18-27.
- Walther, G.-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.-M., Hoegh-Guldberg, O., Bairlein, F., 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, pp. 389-395.
- Warren, F.J., 2004. *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne*. Direction des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques. Ressources naturelles Canada. Ottawa, Ontario, pp. 190.
- Weed, A.S., Ayres, M.P., Hicke, J.A., 2013. Consequences of climate change for biotic disturbances in North American forests. *Ecological Monographs*. 83(4), pp. 441-470

- Westerling, A.L., Hidalgo, H.G., Cayan, D.R., Swetnam, T.W., 2006. Warming and Earlier Spring Increase Western U.S. Forest Wildfire Activity. *Science*. 313 (5789), pp. 940-943
- Williams, M.I., Dumroese, R.K., 2013. Preparing for Climate Change: Forestry and Assisted Migration. *Journal of Forestry*, 111, pp. 287-297
- Woodall, C.W., Oswalt, C.M., Westfall, J.A., Perry, C.H., Nelson, M.D., Finley, A.O., 2009. An indicator of tree migration in forests of the Eastern United States. *Forest ecology and Management*. 257, pp. 1434-1444
- van Mangtem, P.J., Stephenson, N.L., Byrne, J.C., Daniels, L.D., Franklin, J.F., Zulé, P.Z., Harmon, M.E., Larson, A.J., Smith, J.M., Taylor, A.H., Veblen, T.T., 2009. Widespread increase of tree mortality rates in the western United States. *Science*. 323(5913), pp. 521-524