

SIMULANDO TRAYECTORIAS DE SUCESIÓN POST-INCENDIO BAJO ALTERNATIVAS DE CLIMA Y GESTIÓN: CASO DE ESTUDIO BOSQUE NACIONAL DE APACHE-SITGREAVES, ARIZONA

Memoria Trabajo Final del Máster en Gestión y Restauración del Medio Natural

Autora: Alicia Azpeleta Tarancón

Septiembre 2012

Tutores:

Dr. Pete Z. Fulé

School of Forestry, Northern Arizona University, Flagstaff AZ

Dr. Jordi Cortina Segarra

Departament d'Ecologia, Universitat d'Alacant



ANEXO 2

Evaluación del Trabajo Fin de Máster

ALUMNO/A

APELLIDOS:	AZPELETA TARANCÓN
NOMBRE:	ALICIA

TITULO DEL TRABAJO:

SIMULANDO TRAYECTORIAS DE SUCESIÓN POST-INCENDIO BAJO ALTERNATIVAS DE CLIMA Y GESTIÓN: CASO DE ESTUDIO BOSQUE NACIONAL DE APACHE-SITGREAVES, ARIZONA
--

DIRIGIDO POR:

TUTOR	Nombre: JORDI CORTINA SEGARRA
	Departamento: ECOLOGIA
COTUTOR	Nombre: PETER Z. FULÉ
	Departamento/Empresa: SCHOOL OF FORESTRY, NORTHERN ARIZONA UNIVERSITY

TRIBUNAL EVALUADOR:

PRESIDENTE	Nombre:
	Departamento:
VOCAL	Nombre:
	Departamento:
SECRETARIO	Nombre:
	Departamento:

CALIFICACIÓN OTORGADA

APTO

NO APTO

CALIFICACIÓN NUMÉRICA (0 A 10)

En.....a.....de.....de.....

SIMULANDO TRAYECTORIAS DE SUCESIÓN POST-INCENDIO BAJO ALTERNATIVAS DE CLIMA Y GESTIÓN: CASO DE ESTUDIO BOSQUE NACIONAL DE APACHE-SITGREAVES, ARIZONA

SÍNTESIS:

Dos años después del incendio de Rodeo-Chediski del 2002, el mayor ocurrido en el suroeste de los Estados Unidos hasta dicha fecha, Strom y Fulé evaluaron los efectos de los tratamientos de combustible que se habían realizado 12 años antes del incendio mediante la simulación del desarrollo forestal a 100 años vista utilizando el Forest Vegetation Simulator. La investigación realizada en este trabajo se basa en la revisión del trabajo de Strom y Fulé (2007) utilizando modelos estadísticos para la realización de las simulaciones, pero incorporando varios escenarios de cambio climático y varias alternativas de gestión forestal.



ANEXO 3

Certificado de conformidad

Escrito de conformidad del tutor/cotutor:

Yo, Jordi Cortina Segarra

Certifico:

Qué el alumno/a Alicia Azpeleta Tarancón ha realizado bajo mi dirección, en School of Forestry, Northern Arizona University, Flagstaff AZ para optar al título de Máster en Gestión y Restauración del Medio Natural (UA), el Trabajo de Fin de Máster que lleva por título:

SIMULANDO TRAYECTORIAS DE SUCESIÓN POST-INCENDIO BAJO ALTERNATIVAS DE CLIMA Y GESTIÓN: CASO DE ESTUDIO BOSQUE NACIONAL DE APACHE-SITGREAVES, ARIZONA

Considerando finalizado el presente trabajo, autorizo su presentación y defensa para que pueda ser juzgada por el tribunal correspondiente.

Para que así pueda constar, firmo el presente certificado a:

....., de de 20.....

Firma:

Índice

Resumen.....	1
Agradecimientos	3
1. Introducción.....	5
2. Objetivo.....	8
3. Metodología	9
3.1. Área de estudio	9
3.2. Parcelas de estudio	10
3.3. Medidas de campo	11
3.4. Modelos de simulación	12
3.4.1. Simulación de la estructura forestal	14
3.4.3. Simulación de las alternativas de gestión	19
3.4.3. Simulación del Carbono almacenado	21
3.5. Condiciones de referencia.....	22
4. Resultados	23
5. Discusión	33
6. Conclusiones	36
7. Fuentes consultadas	37

Índice de Tablas, Figuras e Imágenes

Tabla 1. Modelos de Circulación General (GCM) y escenarios de cambio climático disponibles en ClimateForest Vegetation Simulator. Fuente Crookston et al. (2010)...	16
Tabla 2. Escenarios de gestión simulados.	21
Tabla 3. Valores medios, al final de la simulación, de carbono ($Tm\ ha^{-1}$), área basal ($m^2\ ha^{-1}$) y densidad (árboles ha^{-1}) de todos los árboles y valores medios de área basal ($m^2\ ha^{-1}$) y densidad (árboles ha^{-1}) del pino ponderosa bajo cada uno de las combinaciones GCM-escenarios de cambio climático para los rodales tratados y no tratados antes del incendio de Rodeo Chediski.	23
Tabla 4. Valores medios, al final de la simulación, de carbono ($Tm\ ha^{-1}$), área basal ($m^2\ ha^{-1}$) y densidad (árboles ha^{-1}) de todos los árboles y valores medios de área basal ($m^2\ ha^{-1}$) y densidad (árboles ha^{-1}) del pino ponderosa bajo cada una de las combinaciones de Modelo de Circulación General con escenarios de cambio climático y alternativas de gestión, para los rodales tratados antes del incendio de Rodeo Chediski. En negrita se ha marcado los escenarios que se encuentran dentro o muy cercanos al rango histórico de área basal ($9\ a\ 15\ m^2\ ha^{-1}$).	31
Tabla 5. Valores medios, al final de la simulación, de carbono ($Tm\ ha^{-1}$), área basal ($m^2\ ha^{-1}$) y densidad (árboles ha^{-1}) de todos los árboles y valores medios de área basal ($m^2\ ha^{-1}$) y densidad (árboles ha^{-1}) del pino ponderosa bajo cada una de las combinaciones de Modelo de Circulación General y escenario de cambio climático y alternativas de gestión, para los rodales no tratados previamente al incendio de Rodeo Chediski. En negrita se ha marcado los escenarios que se encuentran dentro o muy cercanos al rango histórico de área basal ($9\ a\ 15\ m^2\ ha^{-1}$).	32
Figura 1. Localización aproximada de los rodales tratados y no tratados antes del incendio de Rodeo-Chediski en el Bosque Nacional de Apache Sitgreaves (Arizona, EUA). Fuente: Strom y Fulé (2007).....	10
Figura 2. Esquema de las parcelas en los rodales de estudio, cada círculo representa una parcela del rodal. Fuente: Elaboración propia.	11
Figura 3. Emisiones anuales totales de CO_2 (GtC/año) de todas las fuentes entre 1990 y 2100. Los escenarios de cambio climático aparecen clasificados por las familias A1, A2, B1 y B2 y los grupos de escenarios (A1FI, A1T, A1B). Cada franja de color representa el rango de emisiones desarrollado por los diferentes Modelos de Circulación General. La línea en cada franja de color (discontinua para los grupos A1F1 y A1T y continua para el resto) representa un escenario ilustrativo de cada grupo de escenarios. Fuente: IPCC, 2007.	17
Figura 4. Precipitación en la estación de crecimiento (mm) izquierda y temperatura media anual ($^{\circ}C$) derecha, utilizadas por Climate-Forest Vegetation Simulator para el área geográfica de Apache-Sitgreaves. Los valores de 1990 son los valores	

medios de 1961-1990, las otras barras representan los valores predichos alrededor del 2090 de las distintas combinaciones GCM-escenario. 19

Figura 5. Área basal ($m^2 ha^{-1}$) simulada por especie y combinación de GCM y escenario de cambio climático. En la columna (a) se representa las medias de los rodales tratados y en la (b) la media de los no tratados previamente al incendio de Rodeo-Chediski. 24

Figura 6. Efectos del cambio climático y alternativas de gestión en el área basal, por especies y áreas tratadas y no tratadas antes del incendio de Rodeo-Chediski. 29

Imagen 1. Fotografía histórica de un rodal de pino ponderosa del bosque experimental de Fort Valley, Flagstaff, AZ., en la cual se puede observar las características de baja densidad de árboles de un bosque abierto de pino ponderosa. Autor: G.A. Pearson, 1909. Fuente: USDA Forest Service Photograph. 5

Imagen 2. Ejemplo de un bosque actual de pino ponderosa. Fotografía tomada en Thorpe Park, Flagstaff, AZ. en Septiembre 2012. Se puede observar la elevada densidad de árboles de pequeño tamaño. Fuente: elaboración propia. 6

Imagen 3. Imagen satélite tomada por el Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus, del incendio de Rodeo-Chediski, el 7 de Julio 2002. La vegetación aparece representada en color verde, mientras que las áreas quemadas en rojo. Fuente: NASA Earth Observatory. 7

Imagen 4. Panorama tomado en Marzo de 2012, donde se puede observar los efectos de menor severidad e intensidad del incendio de Rodeo-Chediski en el Bosque Nacional de Apache Sitgreaves en una de las áreas tratadas previamente al incendio (a) en contraposición a una de las áreas no tratadas (b), separadas por un camino de tierra. Fuente: Elaboración propia. 8

LISTADO DE ANEJOS

ANEJO 1. FOTOGRAFÍAS

ANEJO 2. MAPA DE INCENDIOS DE INCENDIOS OCURRIDOS EN ARIZONA ENTRE 1940 Y 2012 QUE SUPERARON LAS 200 HECTÁREAS

ANEJO 3. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y ALTERNATIVAS DE GESTIÓN EN EL ÁREA BASAL, POR ESPECIES

Resumen

El incendio de Rodeo-Chediski del 2002 fue el mayor ocurrido en el suroeste de los Estados Unidos hasta dicha fecha, en términos de severidad y superficie afectada. Afectó a 189.658 hectáreas del Bosque Nacional de Apache-Sitgreaves, dominadas por pino ponderosa (*Pinus ponderosa*) y encino (*Quercus gambelii*). Dos años después del incendio, Strom y Fulé evaluaron los efectos de los tratamientos de combustible que se habían realizado 12 años antes del incendio mediante la simulación del desarrollo forestal a 100 años vista, utilizando el Forest Vegetation Simulator, modelo de simulación estadístico de la dinámica forestal de rodales, llegando a la conclusión de que los tratamientos de combustible previos al incendio tenían una importante trascendencia en la recuperación de un bosque mixto de pino ponderosa y encino tras el incendio, hasta un siglo después. Sin embargo dicho estudio no considera los efectos del cambio climático y tampoco los tratamientos post-incendio, factores no introducidos en la simulación y que podrían alterar sustancialmente los resultados.

La investigación realizada en este trabajo se basa en la revisión del trabajo de Strom y Fulé (2007) utilizando modelos estadísticos para la realización de las simulaciones, pero incorporando varios escenarios de cambio climático y varias alternativas de gestión forestal. Para ello se han introducido las medidas de campo realizadas en 2011 por Kristen L. Shive, para su tesis presentada en Northern Arizona University (Shive, 2012) en las mismas parcelas de estudio y siguiendo los mismos protocolos de medición que en el estudio de partida (Strom y Fulé).

Los resultados de este trabajo sugieren una sobrestimación de los efectos de los tratamientos de combustible pre-incendio en la recuperación del bosque de pino ponderosa y encino décadas después del incendio, por parte de los autores del estudio original; la simulación con escenarios que pronostican un cambio climático severo supusieron la completa eliminación del

bosque actual, tanto en los rodales tratados como en los no tratados previamente al incendio de Rodeo-Chediski y la probable transformación en una comunidad vegetal adaptada al nuevo clima. Por el contrario, los escenarios que contemplan restricción en las emisiones de gases de efecto invernadero generaron un bosque muy denso, muy susceptible a incendios severos de copa. La gestión del bosque mediante aclareo de pino ponderosa de pequeño tamaño permitió, según las simulaciones realizadas, un cambio en la dominancia de las especies, mientras que la quema prescrita a intervalos de 10 y 20 años generó un bosque con características similares a las descritas en el rango histórico.

Agradecimientos

Quisiera dar las gracias a todas las personas que me han ayudado y apoyado durante todo el proceso de elaboración de este trabajo:

A mi tutor, Dr. Pete Z. Fulé, por darme la oportunidad de trabajar en su laboratorio en Northern Arizona University y conocer Flagstaff. Gracias por el apoyo, la confianza, las risas y las excursiones, gracias por compartir experiencias y conocimientos.

A la Dra. Beatriz Duguy, por ponerme en contacto con el Dr. Fulé y guiarme en el inicio del tedioso proceso de conseguir todos los papeles necesarios para visitar los Estados Unidos.

A Kristen L. Shive y su equipo, por el gran trabajo realizado con las medidas de campo.

Al Dr. Andrew Sanchez Meador y Nicholas L. Crookston, por su ayuda con el programa de simulación.

También quisiera agradecer las aportaciones realizadas por mi tutor, Jordi Cortina y mi hermana Luisa, quién ha leído y releído este trabajo ayudándome a darle forma.

Finalmente, a mi familia y amigos por su apoyo.

|

HOJA
INTENCIONADAMENTE
EN BLANCO

1. Introducción

Los bosques de pino ponderosa (*Pinus ponderosa* P. y C. Lawson) del suroeste de los Estados Unidos presentan una densidad muy elevada de pinos de pequeño tamaño (aproximadamente 500-1300 árboles ha⁻¹, Fulé et al., 1997, Moore et al., 2004), que acumulan una gran cantidad de combustible superficial y vertical incrementando la tendencia de incendios de copa de gran envergadura.

En 1886, debido al aprovechamiento económico de la madera de los bosques nacionales de los EUA, se inició una fuerte política de supresión del fuego que se prolongó hasta un siglo más tarde. En 1962 surgieron numerosos estudios científicos que acreditaban la importancia ecológica del fuego en los ecosistemas forestales adaptados a frecuentes regímenes de incendios de superficie, pero no fue hasta 1995 cuando se cambió la política sobre fuego considerando la no supresión de incendios en territorios aislados y los tratamientos de quema prescrita y aclareo como medidas de restauración para la reducción del riesgo de incendios (Stephens y Ruth, 2005).



Imagen 1. Fotografía histórica de un rodal de pino ponderosa del bosque experimental de Fort Valley, Flagstaff, AZ., en la cual se puede observar las características de baja densidad de árboles de un bosque abierto de pino ponderosa. Autor: G.A. Pearson, 1909. Fuente: USDA Forest Service Photograph.

Los bosques de pino ponderosa del suroeste de los Estados Unidos, antes de la supresión del fuego, el pastoreo y la tala, se caracterizaban por ser bosques abiertos (McKenzi et al., 2004), de baja densidad (59-142 árboles ha⁻¹)

(Imagen 1) y mayor tamaño individual que los actuales (Fulé et al., 1997, Moore et al., 2004). La continuidad del sustrato herbáceo y la elevada frecuencia de incendios superficiales, (2 a 25 años Swetnam y Baisan, 1996), limitaban la regeneración del pino sin afectar a los individuos adultos, manteniendo baja la densidad poblacional (Belsky y Blumenthal, 1997).

Los efectos de más de un siglo de supresión del fuego se manifiestan en la actualidad con bosques de pinos de pequeño tamaño, hiperdensos (Cooper, 1960, Covington y Moore, 1994) (Imagen 2) con fuerte competencia por los recursos y frecuentemente atacados por plagas como barrenadores de la corteza y muérdago enano (*Arceuthobium campylopodum*). La gran concentración de pinos y el sotobosque, conformado por un denso estrato de arbustos rebrotadores de copa baja, proporcionan continuidad horizontal y vertical de combustible incrementado la susceptibilidad de los bosques a incendios severos y extensos de copa de gran intensidad.



Imagen 2. Ejemplo de un bosque actual de pino ponderosa. Fotografía tomada en Thorpe Park, Flagstaff, AZ. en Septiembre 2012. Se puede observar la elevada densidad de árboles de pequeño tamaño. Fuente: elaboración propia.

Las proyecciones de cambio climático para el suroeste de los Estados Unidos coinciden en apuntar a un aumento de las temperaturas, mayores sequías (Seager et al., 2007), incendios de mayor severidad, intensidad, frecuencia y superficie (Westerling et al., 2006, Miller et al., 2009). Además, estas predicciones contemplan una ampliación de la temporada de incendios y una aceleración del cambio en la distribución de especies con una sustitución

de pinares por matorrales y pastizales (Savage y Mast, 2005, Lenoir et al., 2008). Esta sustitución se produciría por declive del pino, incapaz de enfrentarse a condiciones climáticas desfavorables para su desarrollo, junto a incendios severos que promoverían especies con capacidad rebrotadora.

El incendio de Rodeo-Chediski tuvo lugar en junio de 2002 en Arizona y afectó a 189.658 hectáreas del Bosque Nacional de Apache – Sitgreaves (Imagen 3), dominado por pino ponderosa y encino, convirtiéndose en el más severo y de mayor superficie afectada ocurrido en el suroeste de los Estados Unidos hasta dicha fecha. Parte del área afectada por el incendio había sido previamente tratada con quemas prescritas y aclareo por el servicio forestal (US Forest Service) al menos en los 12 años previos al incendio. Esto proporcionó una valiosa oportunidad para estudiar la efectividad de los tratamientos de reducción de combustible frente a la severidad e intensidad de los incendios.

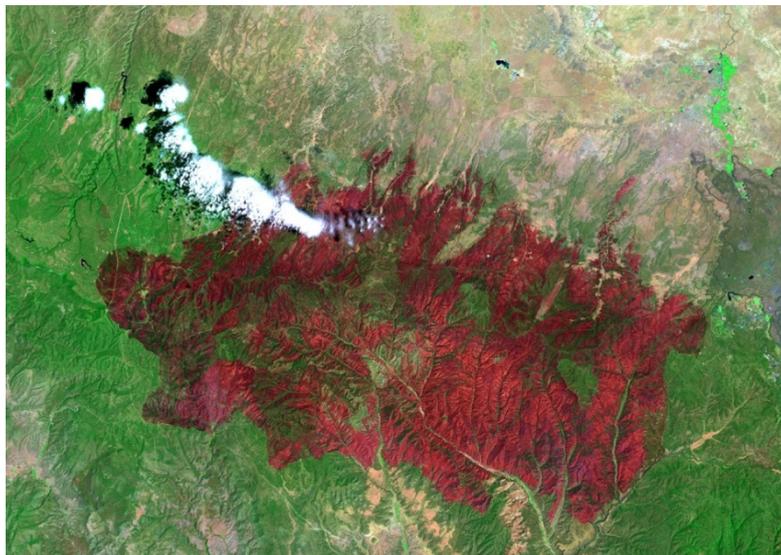


Imagen 3. Imagen satélite tomada por el Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus, del incendio de Rodeo-Chediski, el 7 de Julio 2002. La vegetación aparece representada en color verde, mientras que las áreas quemadas en rojo. Fuente: NASA Earth Observatory.

Dos años después del incendio, Strom y Fulé (2007) evaluaron los efectos inmediatos y a largo plazo de los tratamientos de combustible realizados antes del incendio comparando zonas tratadas y no tratadas del

mismo Bosque Nacional. Sus resultados indicaron que la severidad e intensidad del incendio en las áreas tratadas fueron menores que en las áreas no tratadas, hecho probado por la menor mortalidad y menor altura de tronco quemado en las áreas tratadas (Imagen 4). La simulación del desarrollo forestal a 100 años vista indicó que las áreas tratadas y no tratadas presentaron trayectorias de desarrollo distintas; en las áreas tratadas el bosque se dirigía hacia la recuperación de pino ponderosa y encino, mientras que en las áreas no tratadas se producía un cambio hacia un matorral dominado por encino. Estos autores llegaron a la conclusión de que los tratamientos de combustible previos al incendio de Rodeo-Chediski fueron útiles para la recuperación del bosque de pino ponderosa y encino, hasta por lo menos un siglo después del incendio (Strom y Fulé 2007).

(a)

(b)



Imagen 4. Panorama tomado en Marzo de 2012, donde se puede observar los efectos de menor severidad e intensidad del incendio de Rodeo-Chediski en el Bosque Nacional de Apache Sitgreaves en una de las áreas tratadas previamente al incendio (a) en contraposición a una de las áreas no tratadas (b), separadas por un camino de tierra. Fuente: Elaboración propia.

2. Objetivo

En el presente trabajo final de máster se reevaluó el estudio de Strom y Fulé (2007) incorporando varios escenarios de cambio climático y varias alternativas de gestión para (1) evaluar cómo el cambio climático afecta a la estructura forestal futura y (2) cómo la gestión interactúa con el cambio climático.

Los objetivos específicos de este estudio son: (1) estimar la futura estructura forestal, a 100 años vista, con las medidas de campo tomadas en 2011 utilizando el Forest Vegetation Simulator (FVS-Dixon, 2011), (2) estimar

los cambios en la estructura del bosque y almacenamiento de carbono bajo diferentes escenarios de cambio climático utilizando el modelo Climate-FVS (C-FVS-Crookston et al., 2010) y (3) comparar alternativas de gestión mediante el modelo Fire and Fuels Extension (FFE-FVS-Rebain, 2012).

A partir de los resultados de las diferentes simulaciones se pretende determinar las estrategias de gestión que bajo los efectos de cambio climático, posibilitan la recuperación post-incendio hacia un bosque de características similares a las del bosque de referencia un siglo después.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra en el Bosque Nacional Apache-Sitgreaves, situado en la provincia fisiográfica de la Meseta del Colorado, en el noreste de Arizona. Los rodales estudiados se encuentran entre 1990 y 2072m de altitud s.n.m. El lecho de roca subyacente consiste en roca caliza y la textura varía desde arcillosa hasta franco arenosa. Los promedios climáticos anuales para el período de agosto del 1950 hasta junio del 2012 de la estación meteorológica Heber Ranger Station (Western Regional Climate Center consultado el 13 de julio de 2012) son: precipitación 438mm (24% en invierno y un 36% durante el verano), nevadas 955mm; temperatura media 19°C (temperatura máxima 29° C en julio).

El bosque está dominado por pino ponderosa (*Pinus ponderosa ssp. scopulorum*), acompañado de encino (*Quercus gambelii* Ntt.) y junípero (*Juniperus deppeana* Sted.). El sotobosque está compuesto por encino, junípero, robinia (*Robinia neomexicana* Gray), *Ceanothus fendleri* Gray (Fendler's ceanothus), *Arctostaphylos pungens* Knth (Pinemat manzanita), *Arctostaphylos pringlei* Parry (Pringle manzanita) y *Cercocarpus montanus* Raf. (Mountain mahogany).

3.2. Parcelas de estudio

Se han utilizado las mismas parcelas de estudio de Strom y Fulé (2007).

Tras el incendio de Rodeo-Chediski, el personal del Servicio Forestal identificó siete rodales que habían recibido tratamientos de reducción de combustible, aclareo y quema prescrita, en los 12 años anteriores al incendio e identificaron seis rodales adyacentes con similares características topográficas que no habían recibido tratamiento. En 2004, Strom y Fulé (2007) aprovecharon los mismos rodales, añadiendo un rodal no tratado con el fin de contar con siete pares de rodales (cada par constituido por un rodal tratado y otro sin tratar) con los que evaluar los efectos a corto y largo plazo de los tratamientos de reducción de combustible (Fig.1).

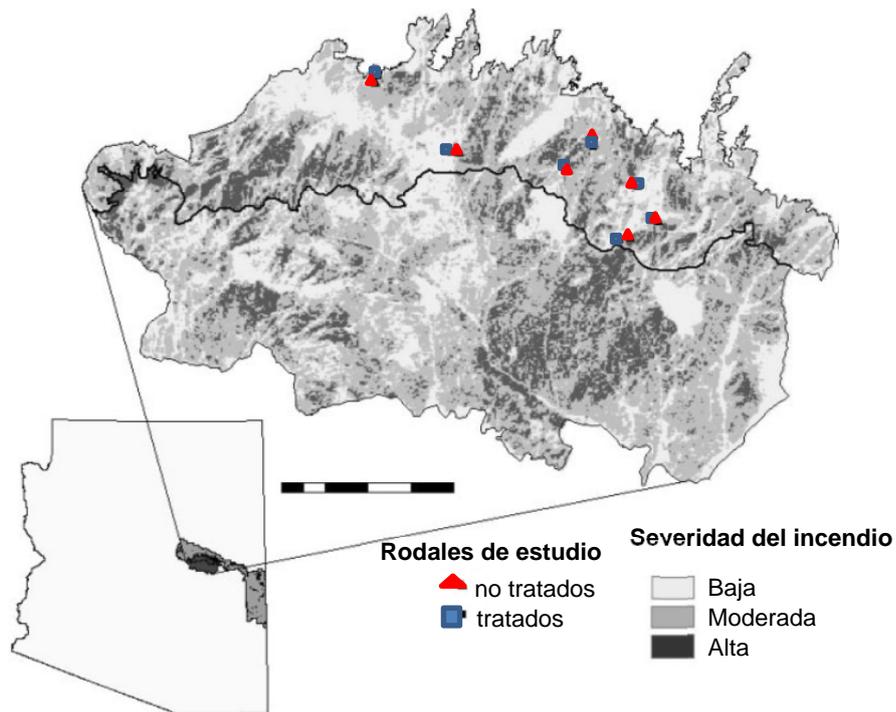


Figura 1. Localización aproximada de los rodales tratados y no tratados antes del incendio de Rodeo-Chediski en el Bosque Nacional de Apache Sitgreaves (Arizona, EUA). Fuente: Strom y Fulé (2007)

Cada uno de los rodales estudiados por Strom y Fulé contiene 10 parcelas, por lo que el análisis abarcó un total de 140 parcelas (70 tratadas y 70 no tratadas). Las parcelas de cada rodal se agrupan en dos mallas regulares de cinco parcelas cada una formando un cuadrado de 100 x100 m, con una parcela en cada vértice y una parcela situada en el centro (Fig.2). Las parcelas se localizaron usando un GPS y se identificaron mediante una estaca de acero (Strom y Fulé, 2007).

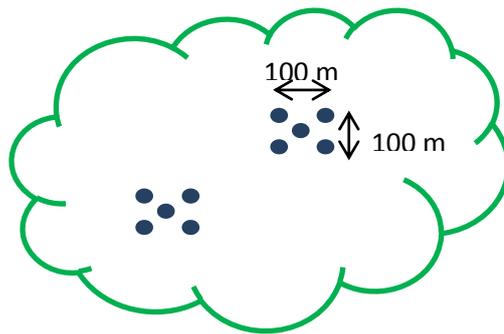


Figura 2. Esquema de las parcelas en los rodales de estudio, cada círculo representa una parcela del rodal. Fuente: Elaboración propia.

En 2011 se remidieron las mismas parcelas de estudio (Shive, 2012) siguiendo el mismo protocolo de medición que en el estudio original. Dado que en cuatro de los rodales no se pudo localizar una de las parcelas, en total se remidieron 70 parcelas en los rodales tratados y 66 en los rodales sin tratar.

3.3. Medidas de campo

Las características del estrato arbóreo, arbustivo y contenido de combustible de las parcelas de estudio se remidieron en 2011 (Shive, 2012) siguiendo los protocolos de medición del estudio inicial (Strom y Fulé, 2007):

- El estrato arbóreo se midió en una parcela de radio variable dónde se utilizó un prisma con un factor de área basal de $2,3 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \text{ árbol}^{-1}$. Se registró el diámetro a la altura del pecho (1,37 m; DBH), condición vivo/muerto y la altura de los diferentes individuos.

- La densidad de regeneración de árboles y arbustos por especie y rango de altura (0-40 cm, 40-80 cm, 80-137cm) se midieron en una subparcela fija de 3,6 m de radio.
- La biomasa leñosa dispuesta en el suelo y la profundidad de suelo forestal se midió a lo largo de un transecto planar de 15,2 m (Brown, 1974) en cada parcela. La profundidad de la capa de humus y la capa de material vegetal sin descomponer o parcialmente descompuesta (horizontes orgánicos) se convirtió en cargas de combustible forestal del suelo (Mg ha^{-1}) utilizando los coeficientes de Ffolliott et al. (1968).

Estas medidas de campo fueron realizadas por Kristen L. Shive para su tesis "*Pre-fire treatments have persistent effects on post-fire plant communities*" presentada en Northern Arizona University en mayo de 2012.

3.4. Modelos de simulación

Numerosos modelos permiten al usuario simular la sucesión vegetal. Estos modelos se pueden clasificar en dos grupos: estadísticos y de procesos o mecanicistas. Los modelos estadísticos se basan en patrones de crecimiento de las especies y dinámica forestal obtenidos de inventarios realizados en áreas determinadas, resultando una simulación bastante precisa si se realiza en un área cercana a los bosques inventariados, equiparable por sus características y condiciones ambientales. Los modelos basados en procesos simulan procesos fisiológicos implicados en el crecimiento y la competencia y permiten incorporar los cambios ambientales, pero requieren parámetros de entrada mucho más complejos.

Por ejemplo, FIRE BioGeoChemical process model (FIRE-BGC-Running y Coughlan, 1988) es un modelo mecanicista desarrollado para investigar procesos ecológicos a largo plazo a escala de paisaje. Se inicializa con datos como respiración del suelo, trampas de hojarasca, índice de superficie foliar y

la salida de datos se da en valores de evapotranspiración, proyección de índice de área basal e incremento de diámetro. En definitiva, requiere una importante inversión en tiempo y recursos y su salida no resulta útil para los gestores forestales que requieren previsiones de la estructura forestal (densidad, área basal).

Forest Vegetation Simulator (FVS-Dixon, 2011) es un modelo estadístico y el más comúnmente utilizado por los organismos de gestión forestal y los investigadores en los Estados Unidos para simular el desarrollo futuro de rodales forestales, comparar alternativas de tratamientos de gestión y evaluar los efectos de las perturbaciones ecológicas (incendios, plagas y enfermedades), sirviendo de apoyo a las decisiones de gestión que tienen importantes consecuencias ecológicas, sociales y económicas.

Los modelos estadísticos como FVS se desarrollan para predecir la dinámica de rodales forestales sobre la base de medidas de campo comunes (especies, densidad, diámetro, altura), pero no están diseñados para tener en cuenta el efecto del cambio climático. Recientemente, los investigadores han tratado de desarrollar métodos de modelización más útiles, ya sea mediante la integración de procesos y modelos estadísticos (por ejemplo, FVS-BGC, Milner et al., 2003) o mediante la modificación de los modelos estadísticos que determinan el crecimiento o la mortalidad, para reflejar los efectos del cambio climático (Diggins et al., 2010).

Climate-FVS (C-FVS, Crookston et al., 2010) es un nuevo modelo integrado en FVS que proporciona al usuario predicciones de crecimiento y mortalidad de las especies en función del lugar geográfico, altitud y la combinación de tres Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés) con varios escenarios de cambio climático (Tabla1 Crookston et al., 2010).

El Modelo Fire and Fuels Extension (FFE-FVS Rebaín 2012), está integrado dentro del modelo original (FVS). Este modelo simula la dinámica de combustible y el comportamiento potencial de los incendios en el tiempo. Es

ampliamente utilizado por gestores e investigadores para comparar alternativas de manejo, simular incendios y calcular el almacenamiento de carbono. La salida del modelo incluye riesgo de incendio, mortalidad de árboles, carbono, producción de humo, entre otros.

En el presente trabajo, al igual que en el precedente (Strom y Fulé, 2007), se ha utilizado el modelo FVS para estimar la futura estructura forestal, a 100 años vista. Para estimar los efectos del cambio climático se ha empleado el modelo C-FVS y los efectos de las diferentes alternativas de gestión se han estimado con el modelo FFE-FVS.

3.4.1. Simulación de la estructura forestal

El modelo FVS está calibrado para diferentes áreas geográficas de los Estados Unidos o variantes. Cada variante incorpora información sobre las especies, el crecimiento de los árboles, la mortalidad, y las ecuaciones de volumen para esa área geográfica, a partir de datos obtenidos de numerosos inventarios. En el presente trabajo se utilizó la variante Central Rockies, que incorpora los datos de Arizona.

FVS se inicializa con datos estándar de medidas de campo y su salida puede ser a nivel de rodal o a nivel de individuos (árboles), permitiendo analizar por especies los datos de crecimiento, regeneración y mortalidad.

FVS fue utilizado para simular el desarrollo de cada rodal tratado y no tratado. Las simulaciones fueron proyectadas para un periodo de 100 años (2011-2111), en incrementos de 10 años.

Las mediciones realizadas en el 2011 de los rodales tratados y no tratados y las características físicas de los rodales (latitud, longitud, pendiente, elevación, orientación), se ingresaron en una base de datos generada para la lectura de FVS. Con el fin de obtener resultados más precisos se introdujo al mismo tiempo el índice de sitio, el incremento de diámetro y altura y la regeneración de las especies y su supervivencia.

Índice de sitio

El índice de sitio es una variable que caracteriza el crecimiento potencial de un rodal. Se calcula tomando la altura media de los árboles dominantes y codominantes de una determinada edad. Para su cálculo se utilizaron las mediciones de altura tomadas en 2011 (Shive, 2012) y la edad, conocida a partir de las extracciones de cores realizadas en 2004 (Strom y Fulé, 2007).

Se estimó un índice de sitio de 18,6 m en 100 años para la especie pino ponderosa, calculando el percentil 80 de la distribución de las alturas de los árboles entre 80 y 120 años.

Incremento de diámetro y altura

El incremento del diámetro y el crecimiento en altura se estimaron comparando las mediciones de diámetro a la altura de pecho y altura realizadas en 2004 y 2011 para todas las especies.

Regeneración

Con el fin de reproducir la regeneración discontinua del pino ponderosa (Savage et al., 1996), se añadieron dos eventos de regeneración, de la misma magnitud, el primero al inicio de la simulación y el segundo 20 años más tarde.

La densidad de regeneración se calculó a partir de las medidas de campo tomadas en 2011 (Shive, 2012), considerando la media de regeneración de las parcelas de cada rodal obtenidas para cada especie.

Las tasas de supervivencia por especie y rango de altura esperadas se estimaron a partir de las medias de regeneración de dos bosques de pino ponderosa del norte de Arizona (Fulé et al., 2001; Waltz et al., 2003), habiéndose utilizado las siguientes: pino ponderosa 100% para todas las clases de altura; encino y robinia 27%, 45% y 100% para las clases pequeñas, medianas y altas, respectivamente; junípero 36%, 67% y 100%. Con el fin de

no sobrestimar la regeneración se utilizó la opción NoAutoES de FVS, que ordena al programa no agregar episodios de regeneración automáticos.

3.4.2. Simulación de los escenarios de cambio climático

Con el fin de reflejar posibles alternativas de emisión de gases de efecto invernadero, C-FVS pone a disposición del usuario la posibilidad de simular los efectos del cambio climático, en el tiempo, con siete combinaciones GCM-escenario climático (Tabla 1). Los escenarios climáticos son representaciones posibles del clima del futuro que se generan a partir de modelos de circulación general de la atmósfera (GCM's) elaborados por diferentes centros de investigación y basados en escenarios de emisión de gases de efecto invernadero.

Tabla 1. Modelos de Circulación General (GCM) y escenarios de cambio climático disponibles en Climate-Forest Vegetation Simulator. Fuente Crookston et al. (2010).

Centro	GCM	escenario		
Canadian Center of Climate Modeling and Analysis	CGCM3	A2	A1B	B1
Met Office Hadley Centre (UK)	HADMC3	A2	B2	
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Princeton University, NOAA Research)	GFDLCM21	A2	B1	

En general los escenarios A2 predicen un continuo incremento en las emisiones de CO₂ mientras que los escenarios A1B, B1 y B2 predicen diversos grados de restricción en las futuras emisiones (IPCC,2007 Fig.3).

La siguiente figura (Fig.3) muestra las emisiones anuales totales de CO₂ (GtC/año) entre 1990 y 2100. Los escenarios de cambio climático aparecen clasificados por las familias A1, A2, B1 y B2 y grupos de escenarios: en la figura 3a) el grupo A1FI, se basa en proyecciones de uso intensivo de combustibles de origen fósil, el A1T, en combustibles mayoritariamente no de origen fósil, el A1B se basa en un uso equilibrado de todo tipo de fuentes de energía; en la Figura 3b) se representa el grupo A2 que se basa en un aumento poblacional en continuo incremento; en la Figura 3c) se representa el grupo B1, el cual se basa en un crecimiento poblacional hasta el año 2050 y después descende hasta el año 2100 y en la Figura 3d) se representa el grupo B2.que

se basa en un crecimiento poblacional continuo de menor magnitud que el grupo A2. El rango de emisiones desarrollado mediante los Modelos de Circulación General se distingue según el color de la franja.

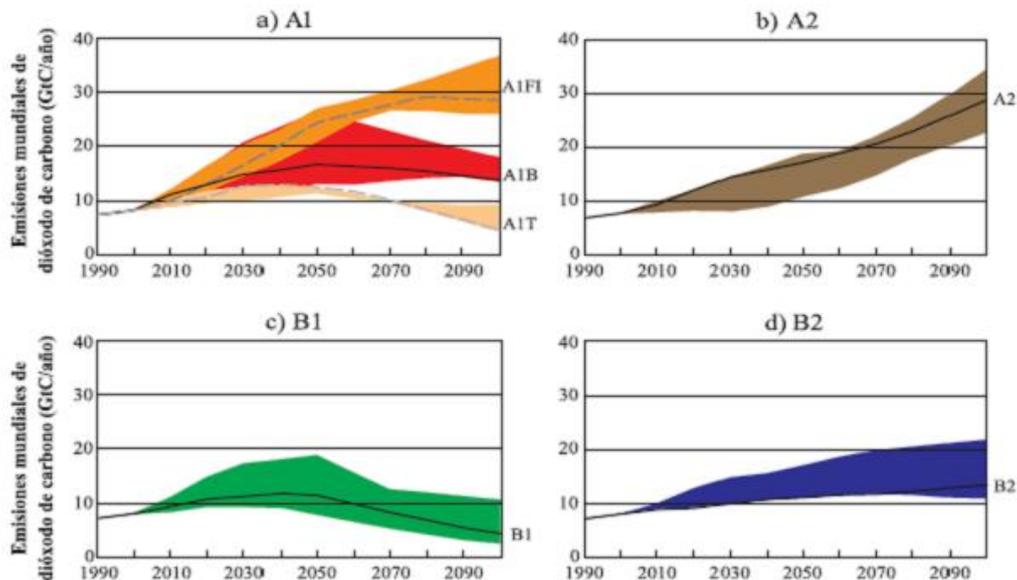


Figura 3. Emisiones anuales totales de CO₂ (GtC/año) de todas las fuentes entre 1990 y 2100. Los escenarios de cambio climático aparecen clasificados por las familias A1, A2, B1 y B2 y los grupos de escenarios (A1FI, A1T, A1B). Cada franja de color representa el rango de emisiones desarrollado por los diferentes Modelos de Circulación General. La línea en cada franja de color (discontinua para los grupos A1FI y A1T y continua para el resto) representa un escenario ilustrativo de cada grupo de escenarios. Fuente: IPCC, 2007.

La idoneidad de una determinada especie en un lugar y con características climáticas determinadas por las combinaciones GCM-escenario, es interpretada por C-FVS con una puntuación de viabilidad: por debajo de 0,2 puntos, la especie está ausente, entre 0,2 y 0,5 puntos la especie disminuye, provocando su mortalidad y de 0,5 a 1 indica su presencia (Crookston et al 2010.).

Las puntuaciones de viabilidad y las variables de clima estimadas por las diferentes combinaciones de GCM-escenario se obtuvieron a través de la página electrónica Get Climate-FVS Ready Data (http://forest.moscowfsl.wsu.edu/climate/customData/fvs_data.php; consultado el 13 de marzo 2012). El archivo de atributos climáticos se usó como datos de entrada en C-FVS.

Cabe mencionar que los resultados de viabilidad de robinia se encuentran incluidos en el conjunto de datos Get Climate- FVS Ready Data pero la variante de Central Rockies del modelo FVS no incluye esta especie, ya que es una especie muy poco estudiada. Para utilizar las puntuaciones de viabilidad de robinia, sus puntuaciones se insertaron en el archivo bajo *Quercus emoryi* (Emory oak), que es de entre las especies rebrotadoras elegibles, la que más se le asemeja en tamaño (Crookston, N.L., conversación telefónica, Mayo 24, 2012).

Para la elaboración del presente trabajo se han realizado 8 simulaciones que incluyen la situación Sin Cambio Climático, identificada como NCC y 7 escenarios de cambio climático que representan todas las combinaciones de GCM y escenarios de emisiones disponibles en C-FVS (Tabla 1).

Las variables climáticas utilizadas para predecir las características futuras de la zona de estudio variaron en función de la combinación GCM-escenario. En general el escenario A2 predice unas condiciones de cambio climático más severas. Los tres GCM-A2 predicen los mayores incrementos de temperatura (41%-38%, más que los valores medios entre 1961 y 1990), aunque dos ellos predicen también una menor precipitación en la estación de crecimiento (76% y 18% menos que los valores medios entre 1961 y 1990) y el otro una mayor precipitación (12% mayor que los valores medios entre 1961 y 1990). Los escenarios A1B, B2 y B1, predicen unas condiciones de cambio climático más moderadas, con un incremento de temperatura entre un 27% y un 34% respecto los valores medios entre 1961 y 1990. El escenario B2 predice un incremento de precipitación de un 10% respecto los valores medios entre 1961 y 1990, mientras que en el caso de los escenarios A1B y B1 predicen una disminución de la misma entre un 8% y un 13%.(Fig.4)

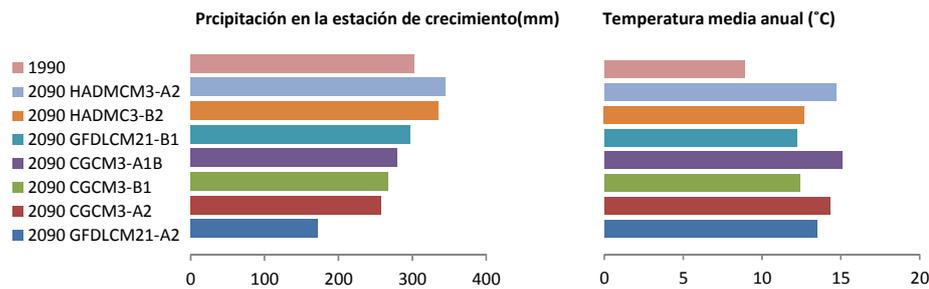


Figura 4. Precipitación en la estación de crecimiento (mm) izquierda y temperatura media anual (°C) derecha, utilizadas por Climate-Forest Vegetation Simulator para el área geográfica de Apache-Sitgreaves. Los valores de 1990 son los valores medios de 1961-1990, las otras barras representan los valores predichos alrededor del 2090 de las distintas combinaciones GCM-escenario.

3.4.3. Simulación de las alternativas de gestión

La gestión de los bosques de pino ponderosa tiene como objetivo la reducción de combustible acumulado. Los métodos más utilizados por los gestores forestales son el aclareo y la quema prescrita. En el aclareo se eliminan los árboles de pino ponderosa de pequeño tamaño, con el objetivo de reducir la densidad disminuyendo la susceptibilidad del bosque a incendios de copa activos. En la quema prescrita se persigue la combustión del combustible dispuesto en el suelo, la eliminación de árboles de pequeño tamaño y la reducción de arbustos rebrotadores sin dañar los árboles adultos. De esta forma se reduce la continuidad de combustible tanto horizontal como vertical, siendo un tratamiento más efectivo para reducir la susceptibilidad del bosque a incendios de copa activos aunque puede conducir a una alta mortalidad de árboles de gran tamaño, puede descontrolarse y genera gran cantidad de humo, lo que puede generar el rechazo de la opinión pública.

En el presente trabajo se simularon con el modelo FFE-FVS futuros regímenes alternativos de gestión basados en las opciones prácticas disponibles para los gestores forestales (Diggins et al., 2010, Stephens et al., 2012, Fulé et al., 2012), bajo cada combinación de GCM y escenario de cambio climático y bajo el escenario NCC, también se incluyó el escenario de no gestión (NT).

Quemas prescritas

Para los tratamientos con fuego, se ejecutaron tres simulaciones con diferentes intervalos de quemas prescritas: 5, 10 y 20 años (Tabla 2). Los intervalos de 5 y 10 años simulan los regímenes de fuego antes de su supresión a finales del siglo XIX (Swetnam y Baisan, 2003), mientras que el intervalo de 20 años refleja la utilidad potencial de un largo periodo sin incendios para reducir los costos, el humo, y la mortalidad de árboles (Diggins et al., 2010).

Las condiciones climáticas utilizadas para la simulación de quema prescrita fueron: velocidad del viento $8,9 \text{ km h}^{-1}$, nivel de humedad 2 (seco), la temperatura $10,4 \text{ }^\circ \text{C}$, y la superficie quemada 70%. Los datos meteorológicos fueron tomados de los promedios de 1964-1996 de la estación meteorológica Heber Ranger Station en el mes de octubre, el mes más común para la quema prescrita.

El modelo de comportamiento del fuego y combustible utilizado fue el 9, que corresponde a un bosque de coníferas de acículas largas, donde el fuego se inicia en superficie a través de la hojarasca dispuesta en el suelo y en el que la concentración de material leñoso muerto contribuye a iniciar incendios de copa (Anderson, 1982).

Aclareo

Se simularon dos tratamientos de aclareo (Tabla 2). En ambos se simuló un aclareo desde la base en un intervalo de 50 años (2041 y 2091). El tratamiento *Thin 40* representa un aclareo que elimina el 60% del área basal y el aclareo *Thin 60* elimina el 40%. Pino ponderosa fue la única especie eliminada. Los árboles eliminados tenían un DBH $<41 \text{ cm}$, que es el DBH más grande que generalmente se considera para la eliminación en restauración de pino ponderosa (Allen et al., 2002). En el caso de que no se encuentren árboles pequeños, no se produce ningún efecto.

En bosques de densidad excesiva los gestores proceden a un primer aclareo para reducir el riesgo de una quema prescrita descontrolada. En el presente trabajo no se ha contemplado dicha opción al tratarse de un área afectada recientemente por un incendio.

Tabla 2. Escenarios de gestión simulados.

Simulación	Descripción
Sin tratamiento (NT)	Sin ningún tipo de gestión durante la simulación
<i>Burn 5</i>	Quema prescrita repetida cada 5 años
<i>Burn 10</i>	Quema prescrita repetida cada 10 años
<i>Burn 20</i>	Quema prescrita repetida cada 20 años
<i>Thin 40</i>	Aclareo del 60% del área basal de pino ponderosa en 2041 y 2091
<i>Thin 60</i>	Aclareo del 40% del área basal de pino ponderosa en 2041 y 2091

3.4.4. Simulación del Carbono almacenado

El cambio climático está fuertemente relacionado con un aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera (IPPC, 2007), por lo que el almacenamiento de carbono en los bosques es vital para mitigar los efectos del cambio climático.

Los tratamientos de reducción de combustible, tales como el aclareo y las quemas prescritas, al reducir la biomasa forestal, reducen al mismo tiempo el carbono almacenado. En el caso del aclareo, si la madera cortada se deja en la superficie del bosque, el CO₂ se libera lentamente a medida que la madera se descompone. Por el contrario si la madera se utiliza, por ejemplo para la construcción, resulta en un almacén de carbono fuera del bosque. En el caso de las quemas prescritas el CO₂ es liberado a la atmósfera.

FFE-FVS tiene la capacidad de estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea utilizando ecuaciones de volumen regionales que provienen de ecuaciones realizadas en varios estudios reunidas en el “National Volume Estimator Library”.

En el presente trabajo se simuló el contenido final de carbono almacenado en la biomasa aérea de las especies para cada una de las combinaciones GCM - escenarios de cambio climático, el escenario de NCC y

los escenarios alternativos de gestión, incluyendo el escenario de no tratamiento (NT), utilizando el modelo FFE-FVS.

3.5. Condiciones de referencia

Un punto de referencia es útil para evaluar los resultados de las simulaciones. Las características estructurales históricas de los bosques del suroeste han sido ampliamente utilizadas como una condición de referencia para la restauración ecológica y los tratamientos de reducción de combustible (Covington et al., 1997, Allen et al., 2002).

En este trabajo se ha calculado un rango de valores de densidad y área basal a partir de los datos cuantitativos procedentes de 46 inventarios forestales históricos y estudios paleoecológicos de reconstrucción de pino ponderosa y bosque mixto de pino ponderosa y encino de la Meseta del Colorado que pueden encontrarse resumidos por Stoddard (2011). Se tomaron los percentiles 25 y 75 de las condiciones del bosque histórico como una guía aproximada de rango de medias históricas. El rango de área basal histórico se encuentra entre 9 y 15 m² ha⁻¹ y el rango de densidad teniendo en cuenta todas las especies se encuentra entre 59 y 142 árboles ha⁻¹.

Los resultados de salida de FVS se obtuvieron por rodales. Con el objetivo de comparar los resultados de los rangos históricos con las diferentes simulaciones, se calculó la media de la densidad de árboles por hectárea y área basal¹ de los rodales al final de la simulación.

¹El área basal se refiere al área basal del rodal definida como el área de la sección transversal de todos los árboles a la altura del pecho por hectárea de bosque o plantación (m² ha⁻¹).

4. Resultados

¿Como alterará el cambio climático a las condiciones del bosque futuro?

Diferentes GCM y escenarios de cambio climático tienen un impacto enorme en la estructura del bosque durante el próximo siglo, que van desde la recuperación de un estado de bosque muy denso hasta la completa eliminación del mismo (Tabla 3, Fig.5).

Tabla 3. Valores medios, al final de la simulación, de carbono ($Tm\ ha^{-1}$), área basal ($m^2\ ha^{-1}$) y densidad (árboles ha^{-1}) de todos los árboles y valores medios de área basal ($m^2\ ha^{-1}$) y densidad (árboles ha^{-1}) del pino ponderosa bajo cada uno de las combinaciones GCM-escenarios de cambio climático para los rodales tratados y no tratados antes del incendio de Rodeo Chediski.

GCM-scenario	Todos los árboles			Pino ponderosa	
	Carbono ($Tm\ ha^{-1}$)	área basal ($m^2\ ha^{-1}$)	densidad (árboles ha^{-1})	área basal ($m^2\ ha^{-1}$)	densidad (árboles ha^{-1})
Tratados					
NCC	59,3	36,2	3290	27,5	1137
CGCM3-A2	0,8	1,4	82	0,0	0
HADMCM3-A2	8,5	3,9	58	3,7	49
GFDLCM21-A2	0,0	0,0	0	0,0	0
CGCM3-A1B	38,7	26,1	2930	16,7	1092
HADMC3-B2	45,6	28,9	3010	19,5	1050
CGCM3-B1	54,3	34,7	3963	23,5	1327
GFDLCM21-B1	47,3	30,3	3156	18,9	1058
No tratados					
NCC	45,5	38,1	2760	15,1	902
CGCM3-A2	2,6	3,9	91	0,0	0
HADMCM3-A2	5,4	4,0	101	1,7	40
GFDLCM21-A2	0,0	0,0	0	0,0	0
CGCM3-A1B	26,5	24,4	2197	8,8	986
HADMC3-B2	37,2	31,5	2355	10,2	781
CGCM3-B1	41,9	37,0	3096	11,1	966
GFDLCM21-B1	38,2	30,8	2508	12,2	855

Las diferencias más pronunciadas se observaron entre los tres GCM que incluían el escenario A2, el escenario socio-político que predice un incremento continuo en las emisiones de gases de efecto invernadero. Este escenario llevó a la completa o casi completa eliminación del bosque actual de pino ponderosa y encino en tan sólo 50 años (Fig.5). Bajo el escenario A2, el área basal total

en 2111 fue de cero en el 50% de las simulaciones y no superó el $5 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ en el resto (Tabla 3). Por lo contrario, los GCM con escenarios que incluyen un cierto nivel de reducción en las emisiones generaron niveles altos de densidad y área basal del bosque de pino ponderosa y encino (Tabla 3, Fig.5).

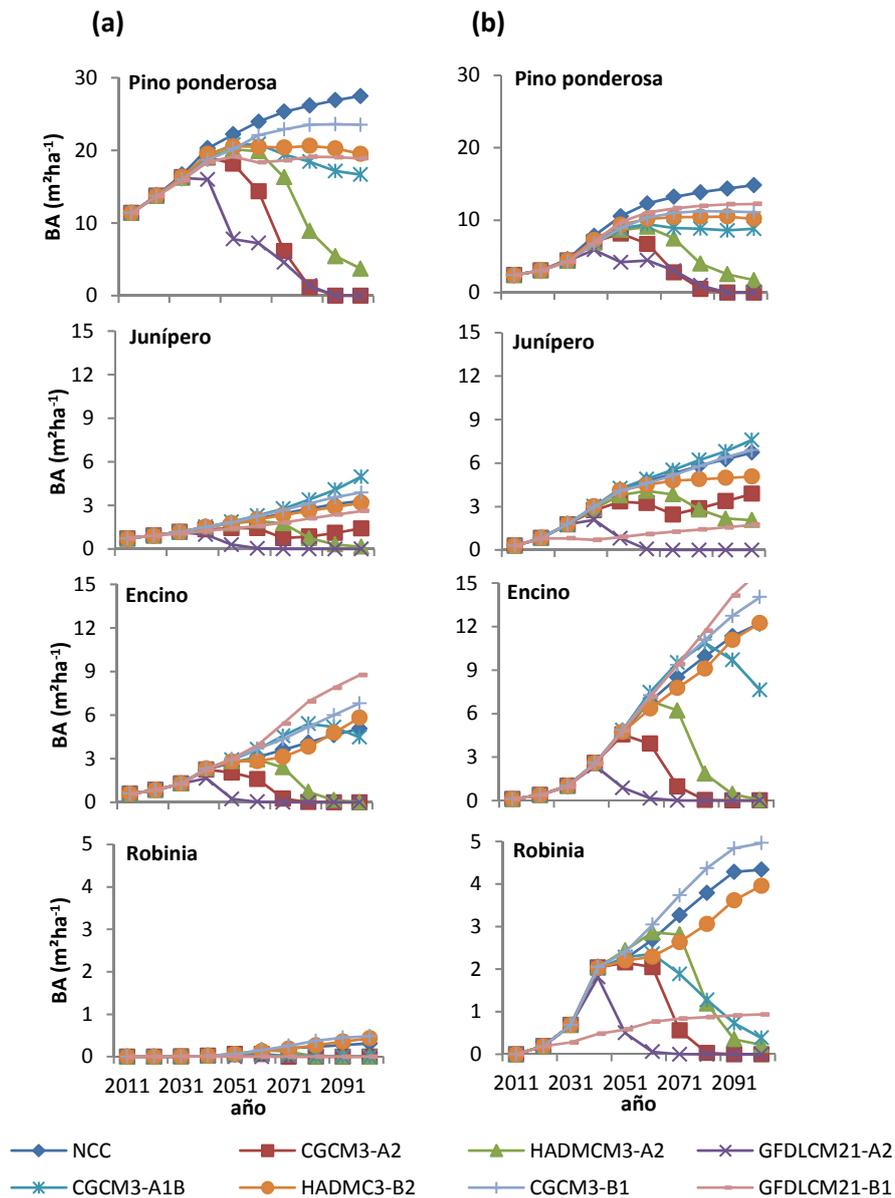


Figura 5. Área basal ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$) simulada por especie y combinación de GCM y escenario de cambio climático. En la columna (a) se representa las medias de los rodales tratados y en la (b) la media de los no tratados previamente al incendio de Rodeo-Chediski.

El carbono total almacenado en la parte aérea de las especies es proporcional al área basal, con un rango que va desde 0 hasta 8,5 Tm ha⁻¹ bajo los escenarios de emisiones A2 (cambio climático severo) y hasta un máximo de 59,3 Tm ha⁻¹ en el caso del escenario de No Cambio Climático (NCC) y No Gestión (NT). Los escenarios intermedios mostraron un almacenamiento medio de 41,2 Tm ha⁻¹ (Tabla 3).

Las especies respondieron de forma diferenciada al cambio climático (Fig.5). En el caso del pino ponderosa, la especie dominante antes del incendio de Rodeo-Chediski, al finalizar la simulación, mostró mayor área basal en el escenario de no cambio climático (NCC) que con cualquier combinación GCM-escenario. En el caso de los escenarios de cambio climático moderado (A1B, B1, B2) el incremento del área basal oscila en un rango del 14% al 40%. Por lo contrario, las otras tres especies mostraron mayor área basal final bajo al menos dos de las combinaciones GCM-escenarios (sin incluir el escenario A2) que bajo el escenario NCC (Fig.5).

Los tratamientos pre-Rodeo-Chediski tuvieron efectos persistentes en los escenarios de cambio climático moderado (A1B, B1 y B2). Pino ponderosa dominó el estrato arbóreo en rodales tratados con una área basal media de 21,2 m² ha⁻¹ frente a 11,4 m² ha⁻¹ en rodales no tratados. Encino fue dominante en los rodales no tratados al final de la simulación con un área basal media de 12,4 m² ha⁻¹. Junípero y robinia mostraron un área basal final mucho mayor en rodales no tratados (5,6 m² ha⁻¹ junípero y 2,9 m² ha⁻¹ para robinia), que en los tratados (3,6 m² ha⁻¹ para junípero y 0,2 m² ha⁻¹ para robinia). Dado que el predominio de pino ponderosa se redujo en todas las combinaciones de escenarios de cambio climático, cada nivel de cambio climático amplificó el efecto del tratamiento pre Rodeo-Chediski sobre la composición del bosque futuro: el predominio del pino después de 100 años se dio en los rodales con tratamiento previo al incendio de Rodeo-Chediski, mientras que en los rodales sin tratamiento previo se produjo un cambio en la dominancia de las especies, siendo el encino la especie dominante (Fig.5).

¿Cómo interactúa la futura gestión con el cambio climático?

El futuro bosque se vio afectado por las diferentes combinaciones de escenarios y GCM, los regímenes alternativos de gestión, y la influencia persistente de los tratamientos pre-Rodeo-Chediski, al igual que en el análisis anterior.

Las combinaciones GCM con escenarios de cambio climático severo (escenario A2) condujeron a que el bosque actual fuera esencialmente eliminado con independencia de las acciones de gestión. En ausencia de fuego, como se puede observar en el escenario de NT y en los tratamientos de aclareo (Fig.6), al final de la simulación solo quedó una pequeña área basal de junípero y pino ponderosa ($<5 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$). En los tratamientos con fuego quedó como máximo un área basal de $4 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ de pino ponderosa, siendo el resto de especies eliminadas a los 90 años de simulación.

En cambio, en los escenarios de cambio climático moderado la simulación de áreas basales después de 100 años resultó bastante similar al escenario NCC (Fig.6).

Las mayores diferencias entre los resultados de las simulaciones se deben a diferentes regímenes de gestión. En el escenario NT, el área basal forestal aumentó durante todo el período de simulación a niveles altos, entre $25,3$ y $37,1 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ en 2111. Los tratamientos de aclareo, 40% y 60%, dieron resultados similares con un rango de área basal en 2111 de 26 a $38,6 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. Por el contrario, los regímenes de gestión que incluyeron la quema prescrita mantuvieron las áreas basales bajas. La quema prescrita cada 5 años (*Burn 5*) condujo a los valores más bajos ($3,2$ a $6,3 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), mientras que la quema prescrita cada 10 años generó valores de área basal de $5,6$ a $10,9 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ y la quema prescrita cada 20 años permitió los valores más altos de área basal ($10,2$ a $14,6 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$). (Tablas 4 y 5)

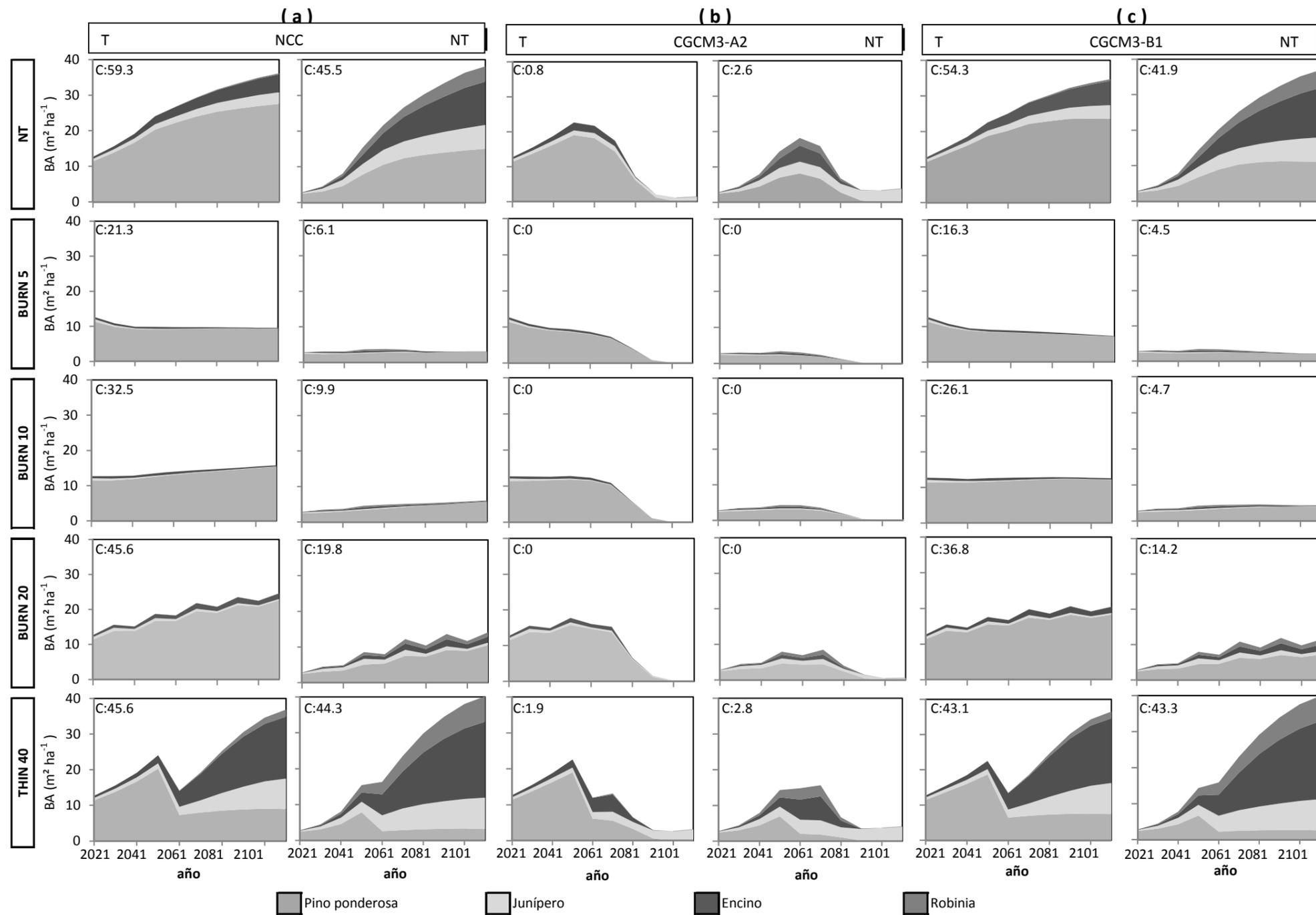
La composición de especies también varió notablemente en función del tipo de gestión considerada. Pino ponderosa fue la especie dominante en los regímenes de quema prescrita, representando el 99%, 97% y 82% del área

basal total bajo quemas prescritas cada 5, 10 y 20 años respectivamente. En contraposición, pino ponderosa sólo representó un 14% del área basal total en los regímenes de aclareo. Encino es la especie dominante en términos de área basal en varios de los escenarios que no incluyen quemas prescritas (Fig.6).

Los efectos de los tratamientos pre-Rodeo-Chediski sobre el área basal, cuando el bosque actual no fue eliminado (es decir, todos los escenarios excepto A2), fueron menos notables que las diferencias creadas por los efectos del cambio climático o los regímenes de gestión. Sin embargo, estos tratamientos generaron diferencias persistentes en la estructura del bosque y la composición de especies (Fig.6). Las áreas basales fueron siempre mucho más bajas en los rodales sin tratamiento que en los rodales tratados bajo los regímenes de quema prescrita, con una disminución del 58% después de 100 años. Por el contrario, los regímenes de manejo sin fuego (sin tratamiento, *Thin 40*, *Thin 60*) generaron áreas basales totales similares en rodales con y sin tratamiento después de 100 años, pero diferían en composición de especies. Pino ponderosa representó un 21% del área basal total en los rodales sin tratamiento vs 44% en los rodales tratados.

Si se observan las gráficas de la figura 6, puede comprobarse que el escenario de cambio climático severo finaliza con la completa o casi completa eliminación del bosque bajo cualquier alternativa de gestión, incluido el escenario de no gestión. El escenario de cambio climático moderado genera resultados similares al escenario sin cambio climático, y en ambos la no gestión y el aclareo dan resultados de área basal muy elevados. En el caso del aclareo, además, se produce un cambio de dominancia de especies. La quema prescrita mantiene baja el área basal del bosque durante toda la simulación, siendo mayor cuando menos frecuente, siendo pino ponderosa claramente la especie dominante. Los tratamientos de combustible realizados antes del incendio de Rodeo-Chediski siguen generando diferencias en los resultados de la simulación, siendo el área basal mayor en las áreas tratadas que en las no tratadas.

HOJA
INTENCIONADAMENTE
EN BLANCO



Las gráficas muestran los efectos del cambio climático y alternativas de gestión en el área basal, por especies y áreas tratadas y no tratadas antes del incendio de Rodeo-Chediski. Por simplicidad, no se muestran todos los resultados de las simulaciones (48 en total), sino más bien un resumen de los resultados en tres grupos: la columna (a) muestra los resultados generados bajo el escenario sin efectos de cambio climático (NCC), en la columna (b) se muestran los resultados de uno de los escenarios de cambio climático severo y en la columna (c) los resultados de uno de los escenarios de cambio climático moderado. En las filas se comparan las alternativas de gestión; no gestión (NT), quema prescrita cada 5, 10 y 20 años BURN 5, BURN 10 y BURN 20 respectivamente. Los dos tratamientos de aclareo tuvieron resultados similares, por lo que sólo se muestran los resultados del aclareo del 60% del área basal THIN 40.

Figura 6. Efectos del cambio climático y alternativas de gestión en el área basal, por especies y áreas tratadas y no tratadas antes del incendio de Rodeo-Chediski.

HOJA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

Tabla 4. Valores medios, al final de la simulación, de carbono ($Tm\ ha^{-1}$), área basal ($m^2\ ha^{-1}$) y densidad (árboles ha^{-1}) de todos los árboles y valores medios de área basal ($m^2\ ha^{-1}$) y densidad (árboles ha^{-1}) del pino ponderosa bajo cada una de las combinaciones de Modelo de Circulación General con escenarios de cambio climático y alternativas de gestión, para los rodales tratados antes del incendio de Rodeo Chediski. En negrita se ha marcado los escenarios que se encuentran dentro o muy cercanos al rango histórico de área basal (9 a 15 $m^2\ ha^{-1}$).

Tratamiento	GCM-escenario	Todos los árboles			Pino ponderosa	
		Carbono ($Tm\ ha^{-1}$)	área basal ($m^2\ ha^{-1}$)	densidad (árboles ha^{-1})	área basal ($m^2\ ha^{-1}$)	densidad (árboles ha^{-1})
NT	NCC	59,3	36,2	3290	27,5	1137
	CGCM3-A2	0,8	1,4	82	0,0	0
	HADMCM3-A2	8,5	3,9	58	3,7	49
	GFDLCM21-A2	0,0	0,0	0	0,0	0
	CGCM3-A1B	38,7	26,1	2930	16,7	1092
	HADMCM3-B2	45,6	28,9	3010	19,5	1050
	CGCM3-B1	54,3	34,7	3963	23,5	1327
BURN 5	GFDLCM21-B1	47,3	30,3	3156	18,9	1058
	NCC	21,3	9,6	40	9,4	35
	CGCM3-A2	0,0	0,0	0	0,0	0
	HADMCM3-A2	5,6	2,5	12	2,5	12
	GFDLCM21-A2	0,0	0,0	0	0,0	0
	CGCM3-A1B	11,3	5,1	27	5,1	25
	HADMCM3-B2	15,2	6,8	29	6,7	27
BURN 10	CGCM3-B1	16,3	7,3	32	7,2	30
	GFDLCM21-B1	14,4	6,4	32	6,3	25
	NCC	32,5	15,7	91	15,4	82
	CGCM3-A2	0,0	0,0	0	0,0	0
	HADMCM3-A2	8,2	4,0	30	4,0	30
	GFDLCM21-A2	0,0	0,0	0	0,0	0
	CGCM3-A1B	18,0	8,8	54	8,6	52
BURN 20	HADMCM3-B2	23,7	11,4	69	11,1	62
	CGCM3-B1	26,1	12,5	79	12,2	67
	GFDLCM21-B1	22,3	10,7	64	10,4	57
	NCC	45,6	24,7	430	22,6	250
	CGCM3-A2	0,0	0,2	7	0,0	0
	HADMCM3-A2	8,4	4,1	42	4,1	40
	GFDLCM21-A2	0,0	0,0	0	0,0	0
THIN 40	CGCM3-A1B	24,7	13,7	250	12,4	153
	HADMCM3-B2	31,9	17,8	395	15,5	200
	CGCM3-B1	36,8	20,5	428	18,2	225
	GFDLCM21-B1	31,2	17,4	341	15,2	175
	NCC	45,6	36,9	3052	8,9	35
	CGCM3-A2	1,9	3,1	136	0,0	0
	HADMCM3-A2	5,8	2,7	32	2,1	10
THIN 60	GFDLCM21-A2	0,0	0,0	0	0,0	0
	CGCM3-A1B	29,4	28,0	2293	4,8	27
	HADMCM3-B2	37,6	31,2	2414	6,5	32
	CGCM3-B1	43,1	36,5	3035	7,4	35
	GFDLCM21-B1	36,7	30,2	2491	5,9	25
	NCC	45,7	36,9	3040	8,9	32
	CGCM3-A2	1,9	3,1	133	0,0	0
	HADMCM3-A2	1,0	0,7	19	0,1	0
	GFDLCM21-A2	1,9	0,0	0	0,0	0
	CGCM3-A1B	30,3	28,7	2432	4,7	22
	HADMCM3-B2	37,6	31,2	2409	6,4	27
	CGCM3-B1	43,1	36,6	3022	7,3	32
	GFDLCM21-B1	36,8	30,3	2483	5,8	22

Tabla 5. Valores medios, al final de la simulación, de carbono ($Tm\ ha^{-1}$), área basal ($m^2\ ha^{-1}$) y densidad (árboles ha^{-1}) de todos los árboles y valores medios de área basal ($m^2\ ha^{-1}$) y densidad (árboles ha^{-1}) del pino ponderosa bajo cada una de las combinaciones de Modelo de Circulación General y escenario de cambio climático y alternativas de gestión, para los rodales no tratados previamente al incendio de Rodeo Chediski. En negrita se ha marcado los escenarios que se encuentran dentro o muy cercanos al rango histórico de área basal (9 a 15 $m^2\ ha^{-1}$)

Tratamiento	GCM-escenario	Todos los árboles			Pino ponderosa	
		Carbono ($Tm\ ha^{-1}$)	área basal ($m^2\ ha^{-1}$)	densidad (árboles ha^{-1})	área basal ($m^2\ ha^{-1}$)	densidad (árboles ha^{-1})
NT	NCC	45,5	38,1	2760	15,1	902
	CGCM3-A2	2,6	3,9	91	0,0	0
	HADMCM3-A2	5,4	4,0	101	1,7	40
	GFDLCM21-A2	0,0	0,0	0	0,0	0
	CGCM3-A1B	26,5	24,4	2197	8,8	986
	HADMC3-B2	37,2	31,5	2355	10,2	781
	CGCM3-B1	41,9	37,0	3096	11,1	966
BURN 5	GFDLCM21-B1	38,2	30,8	2508	12,2	855
	NCC	6,1	3,0	19	3,0	17
	CGCM3-A2	0,0	0,0	0	0,0	0
	HADMCM3-A2	1,4	0,6	2	0,6	2
	GFDLCM21-A2	0,0	0,0	0	0,0	0
	CGCM3-A1B	2,9	1,2	5	1,2	5
	HADMC3-B2	4,3	1,9	12	1,9	7
BURN 10	CGCM3-B1	4,5	2,0	17	2,0	10
	GFDLCM21-B1	3,9	1,7	7	1,7	7
	NCC	9,9	6,0	49	5,7	35
	CGCM3-A2	0,0	0,0	2	0,0	0
	HADMCM3-A2	2,1	1,1	12	1,1	10
	GFDLCM21-A2	0,0	0,0	0	0,0	0
	CGCM3-A1B	4,7	2,4	17	2,3	15
BURN 20	HADMC3-B2	7,1	4,0	34	3,8	27
	CGCM3-B1	4,7	4,4	39	4,0	27
	GFDLCM21-B1	6,0	3,5	24	3,4	22
	NCC	19,8	14,1	386	10,5	175
	CGCM3-A2	0,0	0,5	15	0,0	0
	HADMCM3-A2	3,6	2,6	70	1,9	44
	GFDLCM21-A2	0,0	0,0	0	0,0	0
THIN 40	CGCM3-A1B	8,3	6,7	212	4,6	121
	HADMC3-B2	13,8	10,4	348	6,4	131
	CGCM3-B1	14,2	11,6	385	7,2	153
	GFDLCM21-B1	11,2	9,0	276	6,8	136
	NCC	44,3	40,2	2077	3,2	17
	CGCM3-A2	2,8	4,1	94	0,0	0
	HADMCM3-A2	3,9	3,4	71	0,7	2
THIN 60	GFDLCM21-A2	0,0	0,0	0	0,0	0
	CGCM3-A1B	23,7	24,0	1216	1,6	15
	HADMC3-B2	38,3	34,0	1656	2,4	17
	CGCM3-B1	43,3	39,9	2076	2,6	20
	GFDLCM21-B1	36,7	32,1	1834	2,3	12
	NCC	44,3	40,2	2069	3,1	15
	CGCM3-A2	2,8	4,1	94	0,0	0
	HADMCM3-A2	0,9	1,1	22	0,0	0
	GFDLCM21-A2	2,8	0,0	0	0,0	0
	CGCM3-A1B	24,9	25,1	1336	1,6	17
	HADMC3-B2	38,3	34,1	1651	2,4	15
	CGCM3-B1	43,3	40,0	2064	2,5	15
	GFDLCM21-B1	36,7	32,1	1825	2,2	12

5. Discusión

¿Como alterará el cambio climático a las condiciones del bosque futuro?

La incorporación de escenarios de cambio climático en la simulación de trayectorias cambió drásticamente las condiciones pronosticadas a 100 años vista en comparación con las predicciones presentadas por Strom y Fulé (2007) utilizando las mismas parcelas de estudio. Mientras que en el estudio de Strom y Fulé las áreas tratadas mantenían la dominancia actual del pino ponderosa al final de la simulación y en las áreas no tratadas se producía una codominancia entre pino ponderosa y encino, en el presente trabajo se obtuvieron resultados que abarcan desde la completa eliminación del bosque actual, en los casos de cambio climático severo (escenarios de emisiones A2), a cambios sustanciales en la estructura, el carbono y composición en los casos de cambio de clima moderado. Las diferencias en las predicciones se deben a los efectos del cambio climático en la mortalidad de los árboles, el crecimiento, viabilidad y competitividad, simulados con el modelo C-FVS.

Al comparar los resultados de las simulaciones de cambio climático con el rango histórico de área basal y densidad, los GCM que incluían el escenario de emisiones A2 generaron áreas basales y densidades de árboles muy por debajo de los valores mínimos del rango histórico de referencia, indicando una sucesión hacia una comunidad más adaptada a elevadas temperaturas, probablemente dominada por especies arbustivas y herbáceas, con una biomasa y almacenamiento de carbono muy inferior. Por el contrario, los GCM con escenarios de cambio climático más moderado (A1, B2, A1B) generaron áreas basales y densidades mucho mayores que los valores máximos del rango histórico (Tabla 3). Tales densidades recrean un bosque muy susceptible a graves incendios forestales (Fulé et al., 2012), por lo que tampoco sería sostenible a largo plazo.

Los resultados de las simulaciones del modelo C-FVS aplicados al Bosque Nacional de Rodeo-Chediski fueron consistentes con los hallazgos de

Crookston et al. (2010), quienes encontraron un rango similar de pérdida de bosques utilizando el mismo conjunto de escenarios de emisiones y GCM. En ambos estudios, las respuestas específicas de las diferentes especies provocaron cambios en la composición del bosque simulado. Crookston et al. (2010) encontraron que algunas de las combinaciones de escenarios y GCM provocaron una disminución del área basal, pero otras dieron lugar a un mayor crecimiento. A diferencia de lo observado en el presente trabajo, Crookston et al. (2010) no encontraron una relación consistente entre los escenarios A2 y la eliminación del bosque, debido a una composición de especies y situaciones geográficas distintas. Tanto en el estudio de Crookston et al. (2010) como en el presente trabajo algunas especies alcanzaron mayores áreas basales en condiciones de cambio climático, en comparación con el escenario NCC.

¿Cómo interactúa la futura gestión con el cambio climático?

Los regímenes de gestión son indispensables para la obtención de una condición sostenible del bosque a largo plazo. En ausencia de gestión, los siete escenarios de emisiones combinados con GCM y el escenario de NCC llevan a la eliminación del bosque o a condiciones excesivamente densas. En contraste, la incorporación de quema prescrita en los escenarios de cambio climático moderado conlleva la obtención de resultados que se sitúan dentro del rango histórico después de 100 años en, como mínimo, una simulación de cada uno de los tres regímenes (Fig.3). La quema prescrita con frecuencias que van desde 5 a 20 años permitió una alta proporción de pino ponderosa, manteniendo la densidad de los bosques e impidiendo su retorno a niveles hiperdensos. Los GCM que incorporan el escenario de emisiones A2, al igual que el escenario de no tratamiento, finalizaron con a la eliminación del bosque actual.

Diggins et al. (2010) presentaron un estudio realizado en otro lugar de Arizona simulando alternativas de gestión bajo escenarios alternativos de cambio climático. Estos autores también encontraron que la quema repetida

mantuvo estructuras forestales sostenibles incluso cuando se consideraba el efecto del cambio climático. Diggins et al. (2010) utilizaron el modelo FFE-FVS aunque el análisis del clima se llevó a cabo mediante la modificación de las órdenes de FVS para reflejar los efectos de "bajo" y "alto" nivel de cambio climático, parcialmente replicando la capacidad de C-FVS. Concluyeron que el régimen de quema prescrita óptimo variaba en función del escenario de cambio climático: la quema en intervalos de 10 años, un intervalo más cercano al régimen de perturbación histórica, mantuvo el bosque en mejores condiciones en los escenarios de NCC y bajo condiciones bajas de cambio climático, pero los intervalos de 20 años resultaron mejores en condiciones de elevado cambio climático, ya que la pérdida de bosques se agravó con la adicional mortalidad de los árboles asociada con incendios más frecuentes (Diggins et al., 2010). Los resultados del presente trabajo también indicaron diferencias entre las diferentes combinaciones de GCM y escenarios de emisiones, pero en este caso coincidieron con los efectos persistentes de los tratamientos pre-Rodeo-Chediski. El tratamiento *Burn 10* generó estimaciones de área basal y densidad que se situaban dentro del rango de referencia cuando los rodales habían sido tratados antes del incendio de Rodeo-Chediski (Tabla 4), mientras *Burn 20* en los rodales que no habían sido tratados (Tabla 5).

A diferencia de la quema prescrita, los regímenes de aclareo simulados en el presente trabajo y en el de Diggins et al. (2010) no fueron eficaces para la conservación a largo plazo. El área basal del pino se redujo en el aclareo inicial y la estructura del bosque pasó a ser dominada por encinos y juníperos. Si el aclareo se realizara incluyendo todas las especies, podría desempeñar un papel más útil. Sin embargo, tanto el encino como el junípero son eficaces rebrotadoras y su aclareo debería realizarse con una alta frecuencia, pero el aclareo a intervalos tan frecuentes probablemente sería prohibitivamente costoso y plantearía otras preocupaciones ambientales, tales como la necesidad de mantener una densa red de carreteras de acceso. En cambio los regímenes de quemas prescritas frecuentes (5-20 años) mantienen bajas las densidades de estas especies al ser susceptibles al fuego.

6. Conclusiones

El estudio original de Strom y Fulé (2007) concluyó que los tratamientos de combustible pre-Rodeo-Chediski tuvieron efectos persistentes un siglo más tarde, tanto los rodales tratados como no tratados generaron un bosque denso. Al volver a evaluar el área de estudio con C-FVS, los resultados abarcaron una gama mucho más amplia de estructura y composición forestal, incluyendo la eliminación del bosque. Cabe destacar que todos los escenarios de cambio climático redujeron el área basal y el almacenamiento de carbono por debajo del escenario que presupone NCC. Los resultados sugieren que los estudios que utilizan FVS o similares modelos estadísticos de simulación sin incorporación de cambio climático pueden sobreestimar, tal vez de manera drástica, la estructura de los bosques y las reservas de carbono

Los resultados muestran diferencias substanciales en cuanto a características forestales, bajo diferentes escenarios climáticos. La gestión adaptativa, en la que las acciones de gestión son monitoreadas y los resultados se utilizan para refinar las acciones futuras, es fundamental para la gestión de los recursos naturales (Murray y Marmorek, 2003), pero es aún más importante ya que el cambio climático es aún muy incierto. En la actualidad, existe una amplia gama de combinaciones GCM-escenarios que son igualmente probables, pero en 10 ó 20 años el patrón real de cambio será cada vez más claro, permitiendo a los gestores tomar mejores decisiones entre tratar de conservar los ecosistemas nativos o facilitar su transición a comunidades mejor adaptadas al nuevo clima.

7. Fuentes consultadas

Allen, C.D.; Savage, M.; Falk, D.A.; Suckling, K.F.; Swetnam, T.W.; Schulke, T.; Stacey, P.B.; Morgan, P.; Hoffman, M.; Klingel, J.T. 2002. Ecological restoration of south-western ponderosa pine ecosystems: a broad perspective. *Ecological Applications* **12**: 1418–1433. doi: 10.1890/1051-0761(2002)012[1418:EROSPP]2.0.CO;2.

Anderson, H.E. 1982. Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior. USDA Forest Service General Technical Report INT-69, Ogden.

Belsky, A.J. y Blumenthal, D.M. 1997. Effects of livestock grazing on stand dynamics and soils in upland forests of the interior West. *Conservation Biology* **11**:315-327.

Brown, J.K. 1974. Handbook for inventorying downed woody material. USDA Forest Service, Intermountain Research Station General Technical Report INT-16. (Ogden, UT).

Cooper, C.F. 1960. Changes in vegetation, structure, and growth of southwestern pine forest since white settlement. *Ecological Monographs* **30**, 129–164. doi:10.2307/1948549.

Covington, W.W. y Moore, M. M. 1994. Southwestern ponderosa pine forest structure: Changes since EuroAmerican settlement. *Journal of Forestry* **92**(1):39-47.

Covington, W. W.; Fulé, P. Z.; Moore, M. M.; Hart, S. C.; Kolb, T. E.; Mast, J. N.; Sackett, S. S.; Wagner, M. R. 1997. Restoring ecosystem health in ponderosa pine forests of the Southwest. *Journal of Forestry* **95**:23–29.

Crookston, N. L.; Rehfeldt, G. E.; Dixon, G. E.; Weiskittel, A.R. 2010. Addressing climate change in the forest vegetation simulator to assess impacts on landscape forest dynamics. *Forest Ecology and Management* **260**: 1198-1211.

Diggins, C.; Fulé, P.Z.; Kaye, J.P.; Covington, W.W. 2010. Future climate affects management strategies for maintaining forest restoration treatments. *International Journal of Wildland Fire* **19**:903-913.

Dixon, G. E. 2011. Essential FVS: A user's guide to the Forest Vegetation Simulator. Internal Rep. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Management Service Center.

Ffolliott, P.F.; Clary, W.P.; Davis, J.R. 1968. Some characteristics of the forest floor under ponderosa pine in Arizona. USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station Research Note RM 127. (Fort Collins, CO).

Fulé, P.Z.; Covington, W.W.; Moore, M.M. 1997. Determining reference conditions for ecosystem management of southwestern ponderosa pine forests. *Ecological Applications* **7**(3):895-908.

Fulé, P.Z.; Waltz, A.E.M.; Covington, W.W.; Heinlein, T.A. 2001. Measuring forest restoration effectiveness in hazardous fuels reduction. *Journal of Forestry* **99**(11):24–29.

Fulé, P.Z.; Crouse, J.E.; Roccaforte, J.P.; Kalies, E.L. 2012. Do thinning and/or burning treatments in western USA ponderosa or Jeffrey pine-dominated forests help restore natural fire behavior? *Forest Ecology and Management* **269**:68–81, doi:10.1016/j.foreco.2011.12.025.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate change 2007: synthesis report, contribution of Working Groups, I, II and III to the 4th assessment report. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.

Lenoir, J.; Gégout, J.C.; Marquet, P.A.; de Ruffray, P.; Brisse, H. 2008. A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century, *Science*, Vol 320: 1768-1771.

Milner, K.S.; Coble, D.W.; McMahan, A.J.; Smith, E.J. 2003. FVSBGC: a hybrid of the physiological model STAND-BGC and the forest vegetation simulator. *Canadian Journal of Forest Research* **33**: 466–479. doi:10.1139/X02-161.

Miller, J.D.; Safford, H.D.; Crimmins, M.A.; Thode, A.E. 2009. Quantitative Evidence for Increasing Forest Fire Severity in the Sierra Nevada and Southern Cascade Mountains, California and Nevada, USA. *Ecosystems* **12**:16-32. DOI 10.1007/s10021-008-9201-9.

Murray, C. y Marmorek, D.R. 2003. Adaptive management and ecological restoration. pp. 417-428. In: P. Friederici (ed.) Ecological Restoration of Southwestern Ponderosa Pine Forests. Island Press, Washington D.C.

Moore, M.M.; Huffman, D.W.; Fulé, P.Z.; Covington, W. W.; Crouse, J.E. 2004. Comparison of historical and contemporary forest structure and composition on permanent plots in southwestern ponderosa pine forests. *Forest Science* **50**(2):162-176.

Rebain, S. A. comp. 2010 (revised June 26, 2012). The Fire and Fuels Extension to the Forest Vegetation Simulator: Updated Model Documentation. Internal Rep. Fort Collins, CO: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Management Service Center. 396p.

Running, S.W. y Coughlan, J.C. 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling* **42**:125–154.

Savage, M.; Brown, P.M.; Feddema, J. 1996. The role of climate in a pine forest regeneration pulse in the south-western United States. *Ecoscience* **3**: 310–318.

Savage, M. y Mast, J.N. 2005. How resilient are south-western ponderosa pine forests after crownfire? *Canadian Journal of Forest Research* **35**:967–977. doi:10.1139/X05-028.

Seager, R.; Ting, M.; Held, I.; Kushnir, Y.; Lu, J.; Vecchi, G.; Huang, H-P.; Harnik, N.; Leetmaa, A.; Lau, N-C.; Li, C.; Velez, J.; Naik, N. 2007. Model projections of an imminent transition to a more arid climate in south-western North America. *Science* **316**:1181–1184. doi:10.1126/ SCIENCE.1139601.

Shive, K.L. 2012. Pre-fire treatments have persistent effects on post-fire plant communities. Thesis Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Forestry. Flagstaff, Az. Northern Arizona University.111pp.

Stephens, S. L. y Ruth, L. W. 2005. Federal forest fire policy in the United States. *Ecological Applications* **15**:532–542.

Stephens, S. L.; McIver, J. D.; Boerner, R. E. J.; Fettig, C. J.; Fontaine, J. B.; Hartsough, B. R.; Kennedy, P.; Schwilk, D. W. 2012. Effects of forest fuel reduction treatments in the United States. *BioScience* **62**:549–560.

Stoddard, M. 2011. Compilation of historical forest structural characteristics across the southern Colorado Plateau. Ecological Restoration Institute Fact Sheet, Northern Arizona University, Flagstaff AZ.

Strom, B.A. y Fulé, P.Z. 2007. Pre-wildfire fuel treatments affect long-term ponderosa pine forest dynamics. *International Journal of Wildland Fire* 16:128-138.

Swetnam, T. W. y Baisan, C. H. 2003. Tree-ring reconstructions of fire and climate history in the Sierra Nevada and Southwestern United States. In: T. T. Veblen; W. Baker; G. Montenegro; T. W. Swetnam, eds. *Fire and climatic change in temperate ecosystems of the Western Americas*. Ecological Studies Vol. 160. New York: Springer: 158-195.

Waltz, A.E.M.; Fulé, P.Z.; Covington, W.W.; Moore, M.M. 2003. Diversity in ponderosa pine forest structure following ecological restoration treatments. *Forest Science* 49, 885–900.

Westerling, A.L.; Hidalgo, H.G.; Cayan, D.R.; Swetnam, T.W. 2006. Warming and earlier spring increases western US forest wildfire activity. *Science* 313, 940–943. doi:10.1126/SCIENCE.1128834.

Western Regional Climate Center. 16 de Julio, 2012, On-line. Western U.S. Climate Historical Summaries Available at <http://www.wrcc.dri.edu/climsum.html>

ANEJOS

ANEJO 1

FOTOGRAFÍAS



Panorama 1. Imagen de un área del Bosque Nacional de Apache-Sitgreaves completamente arrasada por el incendio de Rodeo-Chediski.. Fuente: Elaboración propia, Marzo del 2012.



Panorama 2. Imagen de un área tratada en contraposición con un área sin tratar previamente al incendio de Rodeo-Chediski, en el Bosque Nacional de Apache-Sitgreaves. Fuente: Elaboración propia.



pino ponderosa

junípero

encino



(a)



(b)



(c)

Imagen: (a) Cicatriz del incendio

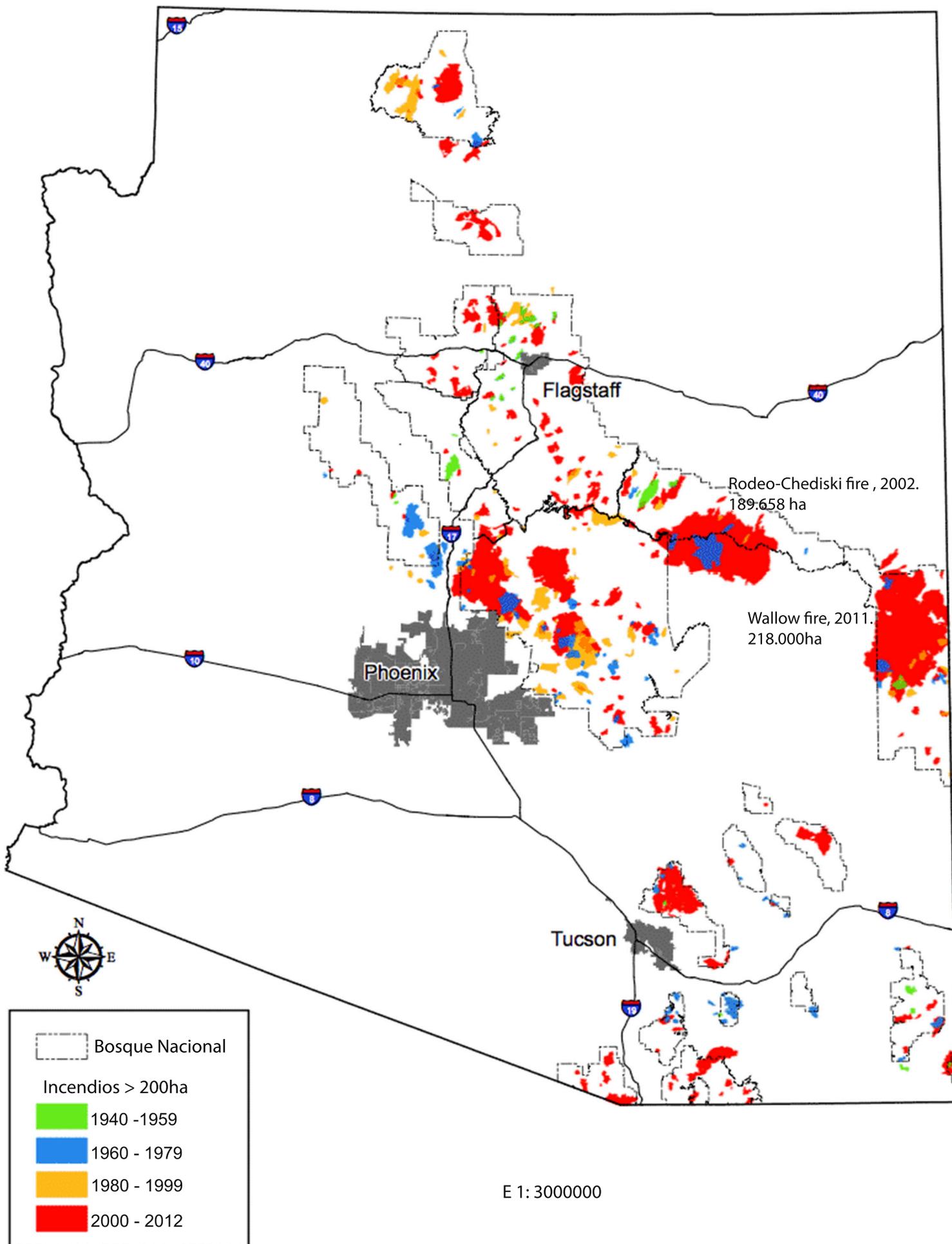
(b) muérdago enano en pino ponderosa

(c) Cicatrices de barrenador de la madera

ANEJO 2

MAPA DE INCENDIOS DE INCENDIOS OCURRIDOS EN ARIZONA ENTRE 1940 Y
2012 QUE SUPERARON LAS 200 HECTÁREAS

ANEXO 2. MAPA DE INCENDIOS ENTRE LOS AÑOS 1940 Y 2012 EN ARIZONA
QUE SUPERARON LAS 200 HECTÁREAS FUENTE: ARIZONA STATE LAND DEPARTMENT



ANEJO 3.

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y ALTERNATIVAS DE GESTIÓN EN EL ÁREA
BASAL, POR ESPECIES

