

TRABAJO FIN DE MÁSTER

EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ABANDONO AGRÍCOLA EN LA EXPOSICIÓN A LOS INCENDIOS FORESTALES EN LA COMARCA DEL MATARRAÑA

Autora: Isabel Gómez Laín

Director: Marcos Rodrigues Mimbrero

Máster Universitario en

**Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del
territorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

Noviembre de 2022



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de
Geografía y Ordenación del
Territorio**



Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias a todas las personas que han contribuido de alguna manera a la realización de este trabajo.

En primer lugar, a Germán y a mis padres porque sin su apoyo a la logística nunca hubiera sido posible sacar el tiempo para cursar el máster, con todo lo que ello conlleva. También quiero expresar mi reconocimiento a mi hija Amalia por su paciencia, comprensión y ánimo a tan corta edad, en nada nos vamos de viaje las dos.

Me gustaría agradecer a Marcos, mi tutor, por su disponibilidad, su comprensión y su aliento, tenemos cosas pendientes, va a ser divertido. A María y Mario, compañeros de fatigas, por escuchar mis llantos en épocas de desesperación y, sobre todo, por las risas, quedaos en Zaragoza, por las diosas.

También, nombrar a Moreno por su capacidad de síntesis en un tema del que no tiene ni idea (cómo se te notan las horas), Mario, Anika, Juli, Yoar, Lauri, Maryflow, Miguel, Juan, las Semus, las Reversibles... y todas las personas que han hecho mi vida un poco más fácil y agradable este último año (Francisco, va por ti también).

Por último, solo me queda añadir: joróbate Flanders.

Resumen

El fuego es un fenómeno natural y elemento fundamental de los ciclos de los ecosistemas mediterráneos y de sus patrones de biodiversidad, pero las dinámicas territoriales y climáticas están provocando que, cada vez más, los eventos extremos vayan desplazando a las quemas pequeñas y controladas que ayudan al ecosistema a autogestionarse. Este trabajo, mediante la tecnología GIS y LiDAR aprendida en el máster, pretende demostrar que la recuperación de los territorios abandonados puede provocar cambios sensibles en la propagación de incendios, disminuyendo su área y, por tanto, la vulnerabilidad de la población residente. Mediante la modelización en FlamMap del escenario actual y una reconstrucción de un escenario en el que no se hubiera dado el proceso de abandono agrario, se obtienen datos interesantes sobre los cambios en distribución y probabilidad de incendio; se verá, como la recuperación de algo más de 40 km² puede provocar disminuciones de estos parámetros en el 50% de la superficie de la Comarca (unos 460 km²), así como una disminución general de los perímetros de incendio.

Palabras Clave: *LiDAR, SIG, probabilidad de quema, Modelo de Combustible, abandono agrario, riesgo y exposición.*

Abstract

Fire is a natural phenomenon and a fundamental element of the Mediterranean ecosystems cycles and their biodiversity patterns, but territorial and climatic dynamics are causing extreme events to displace small, controlled burns that help the ecosystem to self-manage itself. This work combines the skills acquired in GIS and LiDAR technologies with fire behaviour simulation algorithms to demonstrate that the reclamation of abandoned territories can cause significant changes in the spread of fires, reducing the extent of their impact and, therefore, the vulnerability and exposure of the resident population. By means of FlamMap modelling of the current scenario and a reconstruction of a scenario in which the process of agricultural abandonment would not have occurred, interesting data on changes in fire distribution and probability are obtained. The methodology has been exemplified in the Aragonese region of Matarraña/Matarranya where the simulated scenarios (wind and fuel moisture conditions favourable to spread) indicate that the recovery of slightly more than 40 km² of abandoned plots can lead to a decrease in the probability of burning in up to 50% of the area of the region (about 460 km²), as well as a general decrease in the size of fires.

Key Words: *LiDAR, GIS, burn probability, fuel model, agricultural abandonment, risk, exposure.*

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ÁREA DE ESTUDIO	4
3. METODOLOGÍA	6
3.1. Obtención de la topografía y de los parámetros estructurales de la vegetación ..	8
3.1.1. Definición del Modelo de Combustible de superficie	9
3.1.2. Cálculo de Altura de la Base de la Copa (CBH) y de Densidad Aparente (CBD)	
13	
3.1.3. Elaboración de escenarios de paisaje	16
3.2. Parametrización climática y espacialización del comienzo de ignición.....	16
3.2.1. Capa de puntos de ignición.....	16
3.2.2. Contenido de humedad de combustible	17
3.2.3. Determinación de los parámetros de viento.....	17
3.2.3.1. Zona Homóloga del Valle del Ebro.....	17
3.2.3.1.1.Zona de meteoalerta Bajo Ebro Forestal (BEF)	18
3.2.3.2. Zona Homóloga Somontano Sur- Beceite	19
3.2.3.2.1.Zona de meteoalerta Somontano Sur (SMSR)	19
3.2.3.2.2.Zona de meteoalerta Beceite (BCT).....	20
3.3. Simulaciones	21
4. RESULTADOS.....	23
4.1. Patrones espaciales de probabilidad de quema	23
4.2. Cambios en la superficie afectada por el fuego y el tamaño de los incendios simulados	25
4.3. Cambios en la probabilidad de quema.....	25
5. DISCUSIÓN	27
6. CONCLUSIONES	28

Anejo 1: Obtención de la topografía y de los parámetros estructurales de la vegetación

Anejo 2: Cálculos estadísticos aplicados a los resultados de las simulaciones

Anejo 3: Planos

Índice de Tablas

Tabla 1: Clasificación de modelos de combustible. Fuente: Elaboración propia.	12
Tabla 2: Áreas de las especies arbóreas en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del MFE50	14
Tabla 3: Resumen de la predicción de variables y niveles de confianza para los parámetros CBH y CBD. Fuente: Botequim et al (2019)	15
Tabla 4: Datos de humedad considerados para crear el archivo de humedad de la zona de estudio. 1h, 10h y 100h corresponden al combustible fino muerto disponible para la quema en intervalos de 1, 10 y 100 horas respectivamente. Fuente: Alcasena et al (2019)	17
Tabla 5: Número de incendios y superficie quemada por SS en BEF, atendiendo únicamente a siniestros \geq 50 ha. Fuente: Gobierno de Aragón.....	19
Tabla 6: Datos de viento para la situación sinóptica simulada. Fuente: Gobierno de Aragón.	19
Tabla 7: Número de incendios y superficie quemada por SS en SMSR, atendiendo únicamente a siniestros \geq 50 ha. Fuente: Gobierno de Aragón.....	20
Tabla 8: Datos de viento para la situación sinóptica simulada. Fuente: Gobierno de Aragón.	20
Tabla 9: Número de incendios y superficie quemada por SS en SMSR, atendiendo únicamente a siniestros \geq 50 ha. Fuente: Gobierno de Aragón.....	21
Tabla 10: Datos de viento para la situación sinóptica simulada. Fuente: Gobierno de Aragón.	21
Tabla 11: Pesos otorgados a cada escenario calculado para hallar el escenario final. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Gobierno de Aragón.....	22
Tabla 12: Nº de km^2 quemados para las situaciones sinópticas en los distintos escenarios. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Gobierno de Aragón.	25

Índice de figuras

Figura 1: Situación de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	4
Figura 2: Distribución de la población activa según sector de actividad. Aragón y Provincias. (Media anual) Fuente: IAEST, 2018	5
Figura 3: Estadística de incendios forestales en Aragón. Fuente: Gobierno de Aragón.....	6
Figura 4: Esquema de trabajo. Fuente: Elaboración propia.....	7
Figura 5: Límite de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	8
Figura 6: Clasificación de modelos de combustible. Fuente: Elaboración propia según la clasificación de Scott y Burgan, (2005).....	10
Figura 7: Parcelas de cultivo abandonadas cartografiadas en la Comarca del Matarraña. Fuente: Elaboración propia.....	11
Figura 8: Clasificación de formaciones arbóreas. Fuente: Elaboración propia a partir de la información del MFE50.....	13
Figura 9: Distribución del CBH en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.	15
Figura 10: Distribución del CBD en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	16
Figura 11: Zona de meteoalerta Bajo Ebro Forestal (BEF). El círculo rojo engloba la zona que corresponde a la zona de estudio del presente documento Fuente: Modificado del Gobierno de Aragón.....	18
Figura 12: Zona de meteoalerta Somontano Sur (SMSR). El círculo rojo engloba la zona que corresponde a la zona de estudio del presente documento Fuente: Modificado del Gobierno de Aragón.....	20
Figura 13: Zona de meteoalerta Beceite (BCT) Fuente: Modificado del Gobierno de Aragón.	21
Figura 14: Parcelas de cultivo abandonadas cartografiadas en la Comarca del Matarraña. Fuente: Elaboración propia.....	22
Figura 15: Cálculo del escenario sin abandono agrario (ESAA) a partir de los pesos otorgados, la línea gris marca el límite de la Comarca del Matarraña. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura 16: Resumen de los resultados de la simulación de situaciones sinópticas por escenarios, la línea gris marca el límite de la Comarca del Matarraña. Fuente: Elaboración propia.	24
Figura 17: Cálculo las diferencias entre los distintos escenarios. Fuente: Elaboración propia.	25
Figura 18: Variación de la probabilidad de incendio entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.	26

Glosario

BCT: Zona de meteoalerta de Beceite.

BEF: Zona de meteoalerta del Bajo Ebro Forestal.

BP: Probabilidad de incendio.

BTN: Base Topográfica Nacional.

CBD: Densidad Aparente.

CBH: Altura de la Base de la Copa.

CRR: Relación del Relieve del Dosel.

EA: Escenario Actual.

ERC: Componente de liberación de energía.

ESAA: Escenario Sin Abandono Agrario.

FCC: Fracción de Cobertura del Dosel.

GIF: Gran Incendio Forestal.

IAEST: Instituto Aragonés de Estadística.

IGN: Instituto Geográfico Nacional.

Kurt: Curtosis.

MC: Modelo de Combustible

MF50: Mapa Forestal de España a escala 1:50.000.

MITERD: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

P20: Percentil 20.

P95: Percentil 95.

PFRAM: Porcentaje de Primeros Retornos por encima de la Media

PNOA: Plan Nacional de Ortofotografía Aéreo.

SIOSE: Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España.

SMSR: Zona de meteoalerta del Somontano Sur.

Definiciones

BP: probabilidad de que un lugar geográfico específico sufra un incendio forestal durante un período de tiempo determinado.

CBD: (canopy bulk density - CBD) (kg m⁻³) es la masa de combustible disponible por unidad de volumen del dosel (Arellano Pérez, 2021).

CBH: (canopy base height - CBH) (m) es la distancia vertical desde la superficie de la hojarasca hasta la base de la copa de los árboles, considerando ésta como la inserción de las primeras ramas con acículas vivas (Arellano Pérez, 2021).

CRR: descriptor cuantitativo de la forma relativa del dosel a partir de la observación altimétrica (Parker y Russ, 2004), definida como los retornos de la altura media menos la altura mínima dividida por la altura máxima menos la altura mínima.

ERC: está relacionado a la energía disponible por unidad de área dentro del frente del incendio.

FCC: medida de la densidad de la vegetación expresada en tanto por ciento. La cobertura del dosel desempeña un gran papel en la cantidad de luz solar que llega al suelo del bosque.

Curtosis: medida estadística que determina el grado de concentración que presentan los valores de una variable en la región central de la distribución, refleja la cantidad de valores atípico en una muestra.

Difluencia: Patrón de flujo de viento en el que el aire se desplaza hacia fuera (en forma de "abanico") alejándose de un eje central orientado en paralelo a la dirección general del flujo. Es lo contrario de la confluencia.

Modelo de Combustible: estructuras de la vegetación tipo a las que se les presupone un comportamiento frente al fuego conocido, permiten predecir el comportamiento del fuego definiendo, entre otros parámetros, la velocidad de propagación y la longitud de llama.

RCP 8.5: es una trayectoria de concentración de gases de efecto invernadero (no emisiones) adoptada por el IPCC según la cual se crea un escenario de cambio climático en el que las emisiones continúan aumentando durante todo el s. XXI al ritmo actual.

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son un fenómeno natural y elemento fundamental de los ciclos de los ecosistemas mediterráneos y de sus patrones de biodiversidad. Durante miles de años, el ser humano ha utilizado el fuego para transformar y gestionar el territorio, pero la alteración de los regímenes naturales y de las características del paisaje durante las últimas décadas conduce a impactos negativos del fuego, tanto a la sociedad como al medio ambiente (Wunder et al, 2021). En los ambientes mediterráneos, los incendios desempeñan un papel clave en la conservación de los paisajes, pero si sus regímenes se están viendo alterados por acumulación de combustible, temperaturas extremas, sequía, etc, lo que produce un aumento en la intensidad y severidad del fuego. Esto se viene observando en los últimos años con temporadas de incendios forestales más tempranas y largas. Como indican Rodrigues et al (2022b), a 28 de septiembre de 2022 han ardido entre España, Francia y Portugal 469.464 hectáreas (ha), casi 3 veces más que la media anual de 2006-2021. Esta situación ha coincidido con varias olas de calor encadenadas que han aparecido antes de lo habitual y batido récords, tanto de temperatura como de duración. En este sentido, las condiciones meteorológicas cada vez más extremas (este año se ha batido el récord en España, con 42 días bajo ola de calor, Rueda de prensa 19/09/2022 AEMET), unido a un aumento del combustible disponible por el estado de abandono en el que se encuentra buena parte del mundo rural, y su bajo contenido de humedad, proporcionan las condiciones perfectas para la ocurrencia de olas de incendios extremos como las ocurridas en Australia (2019-20), Canadá (2021), oeste de EEUU (2022), Siberia (2020), o Europa (2022) con incendios con un comportamiento extremo (velocidad, intensidad y severidad) fuera de capacidad de extinción. Ya que las actuales políticas de gestión de incendios parecen estar fallando, es necesario un cambio de paradigma (Moreira et al, 2020; Wunder et al, 2021). La eficacia de la política no debe medirse principalmente en función de la superficie quemada sino en función de los daños y pérdidas socioecológicas evitadas. El cambio de enfoque de la extinción de incendios a la mitigación, prevención y preparación es lógico y pragmático, y es más probable reducir los efectos socioeconómicos y ecológicos negativos de los socioeconómicos y ecológicos que con el actual; este cambio de política no equivale necesariamente a incrementar los esfuerzos de extinción de incendios, sino más bien a una mayor inversión en las alternativas (políticas agrícolas, forestales o energéticas), que se espera que permitan reducir los gastos de extinción de incendios en el futuro, ya que creará paisajes, estructuras y comunidades más resistentes al fuego (Moreira et al, 2020).

En el último estudio de Jones et al (2022), se enfatiza cómo el cambio climático está aumentando la incidencia de los incendios. Dicho trabajo se ha centrado en los impactos globales y regionales del cambio climático sobre la frecuencia e intensidad de los incendios constatando que la frecuencia con la que se dan las condiciones climáticas propicias para la ocurrencia de grandes incendios ha aumentado de forma considerable debido al aumento de 1,1 °C de temperatura en el periodo post-industrial, especialmente en regiones de la cuenca mediterránea. Coinciendo con Jolly (2015), el estudio concluye que se ha producido un alargamiento de la temporada de incendios durante todo el periodo revisado (1979-2019) que va desde el 27% al 94%. Por otra parte, Wunder et al (2021) identifica la expansión urbana y el éxodo rural como uno de los factores clave en el aumento de la exposición y vulnerabilidad a incendios por parte de la sociedad. En los países mediterráneos, el abandono de las tierras ha creado áreas continuas de bosque no gestionado en tierras agrícolas abandonadas, alimentando densas cargas de combustible. Estos recientes sucesos (condiciones climáticas cada vez más favorables al fuego y con mayor disponibilidad de combustible) refuerzan la evidencia de los límites económicos de las estrategias centradas en la supresión de incendios. Los costes de este tipo de gestión para controlar el fuego se vuelven exorbitantes; por ello, muchos profesionales y responsables políticos reconocen la

necesidad de desarrollar una gestión de incendios más proactiva, centrada en las personas y a lo largo de todo el ciclo de gestión del riesgo de prevención, preparación, respuesta y recuperación, incluida la gestión resiliente del paisaje para la prevención de incendios.

A pesar de la clara influencia del clima, la gestión forestal (silvicultura tradicional, quemas prescritas, recuperación de zonas abandonadas, etc) tiene capacidad para modular el comportamiento de los incendios. En general, el mantenimiento de las prácticas actuales daría lugar a las mayores tasas de actividad de los incendios de copa, mientras que la gestión para la reducción de la vulnerabilidad de los bosques a la sequía se postula como la mejor alternativa para superar las condiciones cada vez más peligrosas previstas en proyecciones climáticas bajo RCP 8.5 (Miezite et al, 2022). Como indican Morán-Ordóñez et al (2020) la gestión actual promueve la acumulación de biomasa forestal y puede conducir a una mayor vulnerabilidad de los bosques ante eventos extremos de sequía o incendios forestales. En un contexto en el que se espera que las perturbaciones aumenten en frecuencia y gravedad, la gestión para reducir el riesgo de incendios o la vulnerabilidad de los bosques a los impactos de la sequía surge como una alternativa razonable que equilibra la prestación de servicios, reduciendo al mismo tiempo el riesgo de daños irreversibles en el funcionamiento de los bosques. En el presente trabajo se ilustra el posible efecto de la recuperación de parcelas abandonadas como vía para restaurar el mosaico paisajístico tradicional en zonas mediterráneas.

En España hay una larga tradición en la lucha contra incendios con diversa normativa al respecto tanto de ámbito nacional como autonómico y municipal. El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, publicó en julio de 2022 la directriz “Orientaciones estratégicas para la gestión de incendios forestales en España”, en la que establece unos objetivos y líneas de acción prioritarias para ello; el objetivo 5- “Profundizar sobre el conocimiento en incendios forestales e influencia del fuego en los ecosistemas” y el 7 - “Incorporar las mejoras tecnológicas que se van produciendo en materia de prevención y extinción de los incendios forestales”, son los que ocupan en este trabajo. Por tanto, la evaluación del riesgo de incendio es una parte fundamental de la prevención de incendios, ya que la planificación de los recursos previos a la irrupción del fuego requiere el uso de herramientas objetivas para controlar cuándo y dónde es más probable que se produzca un incendio, o cuándo y dónde tendrá más efectos negativos. El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) identifica el “riesgo de incremento de incendios forestales por causas naturales y no naturales por acumulación de combustible y condiciones más favorables para la ignición” como uno de los más urgentes en los impactos del cambio climático en los ecosistemas terrestres (Sanz y Galan, 2020). Uno de los principales componentes de la evaluación del riesgo de incendio (pérdida potencial asociada al impacto del fuego) es la peligrosidad, entendida como potencial de ocurrencia de incendios de una cierta magnitud (Chuvieco et al, 2010; 2014). En la estimación del peligro intervienen las características del combustible, las fuentes de ignición (humanas y naturales), la velocidad y dirección del viento y el gradiente de la pendiente (Fernández-Alonso, 2013). En este sentido, los modelos de simulación de incendios (aproximación seguida en este trabajo) proporcionan un conjunto de resultados relacionados con el potencial de propagación e intensidad del fuego basados en escenarios caracterizados en función de los factores anteriormente mencionados (Parisien et al, 2019).

En España ocurren unos 550.000 incendios forestales al año con una superficie total quemada de aproximadamente 7,5 Mha (75.000 ha/año) según el registro del último medio siglo (Moreno et al, 2015). Estos autores apuntan a que los incendios forestales se reparten por toda la geografía nacional y a un incremento de estos, asociado al cambio climático. A noviembre de 2022, en España han ardido más de 300.000 ha, siendo el verano en el que más ha ardido en lo que va de siglo XXI. En concreto, en Aragón, y según el último Boletín de Incendios Forestales y Meteorología redactado por el Gobierno de

Aragón con fecha de actualización en agosto de este mismo año, el número de incendios y la superficie forestal afectada de este año están muy por encima de la media histórica 2005-2021; con 407 incendios, de los cuales 296 conatos y 22.075,99 ha forestales calcinadas, incluidos 4 Grandes Incendios Forestales (GIF, incendios superiores a 500 ha), superando las 5000 y 10.000 hectáreas en algunos casos. Entre las principales causas de la ocurrencia de incendios de estas dimensiones se apunta a la continuidad del combustible.

El abandono de la agricultura ha configurado las zonas rurales y de montaña en muchas partes de la Europa mediterránea. El cese de las prácticas ganaderas y agrícolas tradicionales provocado por el éxodo rural ha favorecido la configuración de paisajes más homogéneos e inflamables -con fuertes efectos secundarios sobre el régimen de incendios, los servicios ecosistémicos y la biodiversidad (País et al, 2020). En las últimas décadas se han propuesto diversas prácticas de tratamiento del combustible (como las quemas prescritas o los tratamientos mecánicos como el clareo o la masticación de los bosques) para reducir la cantidad de combustible, la continuidad del mismo y el riesgo asociado de incendios forestales de gran gravedad. Ya en 2015, Ric e Ibarra apuntaron al proceso de abandono agrario en la Comarca del Matarraña como un riesgo asociado a la pérdida de cortafuegos naturales y zonas de seguridad en las labores de extinción de incendios (Ric e Ibarra, 2015). A este respecto, la Comarca lleva años desarrollando el proyecto “Banco de Tierras del Matarraña” (<http://www.comarcamatarranya.es/index.php/serviciosmedio/banco-de-tierras>) para la recuperación de parcelas abandonadas como forma de detener el avance de posibles incendios, recuperar y mantener el uso del suelo y contribuir al mantenimiento del sector primario.

Por todo lo anterior, el objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es evaluar la exposición al fuego como consecuencia del abandono agrícola. Para ello se utilizan algoritmos de simulación de propagación y comportamiento del fuego apoyados en (i) información LiDAR para la caracterización de los modelos de combustible y el dosel arbóreo, (ii) escenarios de condiciones sinópticas y de humedad de los combustibles, y (iii) los patrones históricos de ignición. Las herramientas de simulación, como el algoritmo MTT implementado en FlamMap 6.0, permiten realizar simulaciones a escala de paisaje para caracterizar la probabilidad de quema (probabilidad de que un incendio alcance una determinada ubicación), siendo herramientas de gran utilidad en las que apoyar la planificación estratégica para mitigar el riesgo y/o exposición al fuego (Alcasena et al, 2019, Botequim et al, 2019, Fernandez-Alonso, 2019, Finney, 2002 y 2006, Holden, 2009, Keane, 2001, Nelson, 2000, Parisien, 2019, Rodrigues, 2020)

El estado y distribución de los combustibles conforman un elemento básico, tanto en la estimación del riesgo como del comportamiento del fuego, por lo que resulta esencial contar con información precisa sobre determinadas características de estos (Fidalgo-González et al, 2019). El desarrollo de cartografía temática de combustibles forestales es un requerimiento indispensable para realizar simulaciones de comportamiento del fuego a escala paisaje con el propósito de delimitar zonas prioritarias de actuación y evaluar la efectividad de diferentes alternativas de gestión (Keane y Burgan, 2001) o para la predicción de la severidad potencial del fuego (Holden et al., 2009). En este sentido, como ya apuntaba Romero Cabezudo (2020) “las técnicas de tratamiento de datos LiDAR podrán ofrecer datos precisos sobre las características estructurales de la cubierta vegetal”, una afirmación similar a la planteada en Andersen et al (2004) al concluir, por un lado, que las estimaciones de combustible del dosel basadas en la distribución de las mediciones de altura del LiDAR se pueden utilizar para generar archivos que proporcionen una descripción espacialmente explícita de la distribución de los combustibles del dosel en el paisaje y, por otro, que estos archivos pueden servir como entrada directa en un modelo de comportamiento del fuego, lo que permite una predicción más realista y precisa de la propagación e intensidad del fuego. En este trabajo se aborda la caracterización de la distribución y

tipología de combustibles de superficie a partir de cartografía de ocupación del suelo e información complementaria, la caracterización de la topografía y de la estructura del dosel arbóreo mediante información LiDAR para el desarrollo de simulaciones adhoc para evaluar el efecto del abandono de las parcelas del programa Banco de Tierras en el potencial de exposición al fuego.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La Comarca del Matarraña es una comarca aragonesa situada al este de la provincia de Teruel. Está enclavada en una zona geográfica de relieve variable, y su territorio corresponde aproximadamente con la cuenca del río Matarraña más la parte aragonesa de la cuenca del río Algars. Nexo entre Cataluña, Aragón y la Comunidad Valenciana, con una extensión de 933 km², la Comarca está compuesta por 18 municipios siendo Valderrobres la capital administrativa, mientras que Calaceite es la capital cultural (Figura 1).

Los primeros testimonios de ocupación humana datan de entre el Neolítico y la Edad del Cobre, como demuestra el arte rupestre levantino encontrado en sus cuevas. Esto da una idea del tiempo que lleva el ser humano modificando el paisaje de esta Comarca.

Se trata de una zona de contrastes, atravesada de Sur a Norte por el río Matarraña, en la que las cotas mínimas se sitúan en torno a los 300 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y las más altas por encima de los 1400 m.s.n.m.

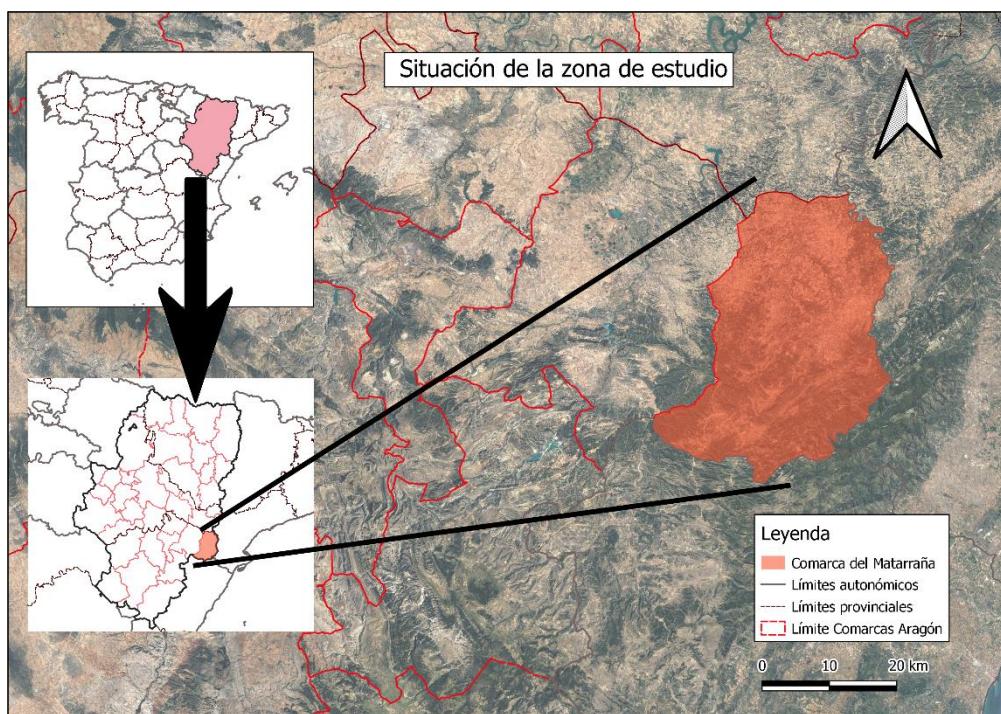


Figura 1: Situación de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

La población en la Comarca ha descendido considerablemente a lo largo del último siglo, según datos del 2018 del Instituto Aragonés de Estadística (IAEST) en el año 1910 la zona contaba con 24.041 habitantes, siendo en el año 2017 de solo 8259 habitantes. Sin embargo, desde el año 2000, la evolución censal se ha ido manteniendo, por lo que la despoblación parece haberse estabilizado. (IAEST, 2018). Además de este descenso de población del 34,4%, hay que tener en cuenta que la Comarca cuenta con una población muy envejecida, con solo un 56% la población activa o en edad de trabajar, esta media no está tan lejos de la media aragonesa, que para ese mismo año sitúa la población activa como un 58,67% del total. La población activa de la Comarca basa sus actividades laborales en los sectores de servicios 63,9%, industria 13,1%, y agricultura 10% (siendo la tasa del 6,7% para Aragón y 10,2% para la provincia de Teruel); ocupando el sector de la construcción el último puesto 8,2%. (Fontanet Latorre,

2020). En la Figura 2 se muestran las estadísticas por provincia y la general de la comunidad autónoma. Destaca la baja industrialización de la Comarca en relación con el porcentaje de la provincia de Teruel, así como el alto porcentaje de población dedicado al sector de la construcción.

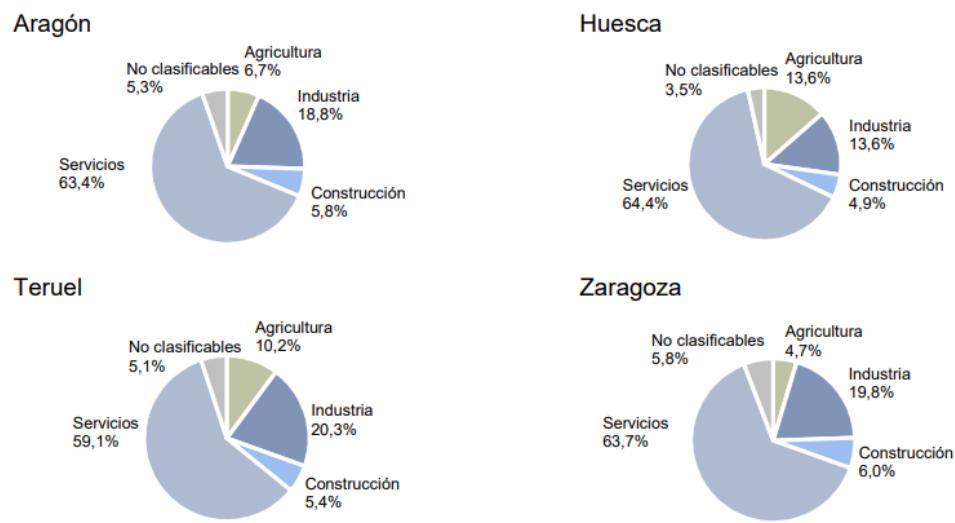
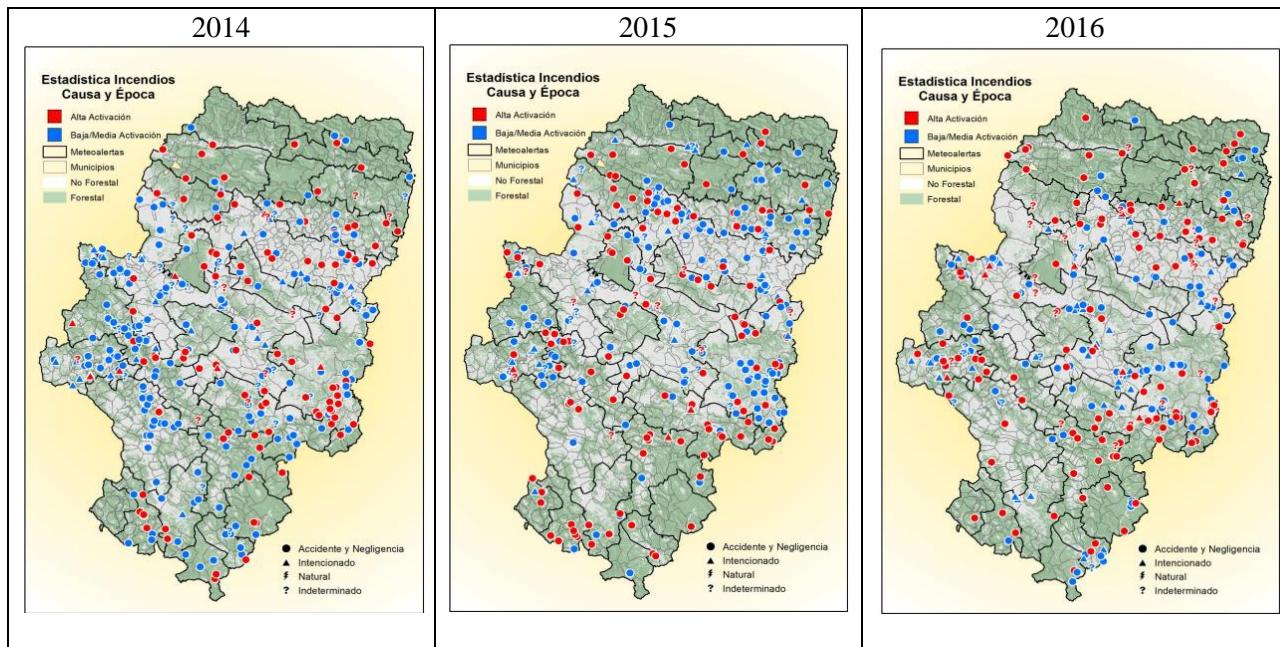


Figura 2: Distribución de la población activa según sector de actividad. Aragón y Provincias. (Media anual) Fuente: IAEST, 2018

El auge del sector servicios, la despoblación y el envejecimiento han contribuido al abandono de tierras de cultivo que se viene exponiendo, aumentando así el potencial del paisaje para experimentar grandes incendios. A este respecto, la Comarca del Matarraña viene sufriendo, a lo largo de los años que se tiene registro, incendios de forma reiterada como puede observarse en la Figura 3. Haciendo una interpretación preliminar, se puede observar que, a excepción de los años 2017 y 2020, los incendios más frecuentes son de alta activación, causados tanto por agentes naturales (principalmente en las estribaciones montañosas al sur) como por accidentes y negligencias vinculadas a actividades antrópicas (Estadísticas de incendios forestales en Aragón <https://www.aragon.es/-/estadisticas-de-incendios#anchor2>).



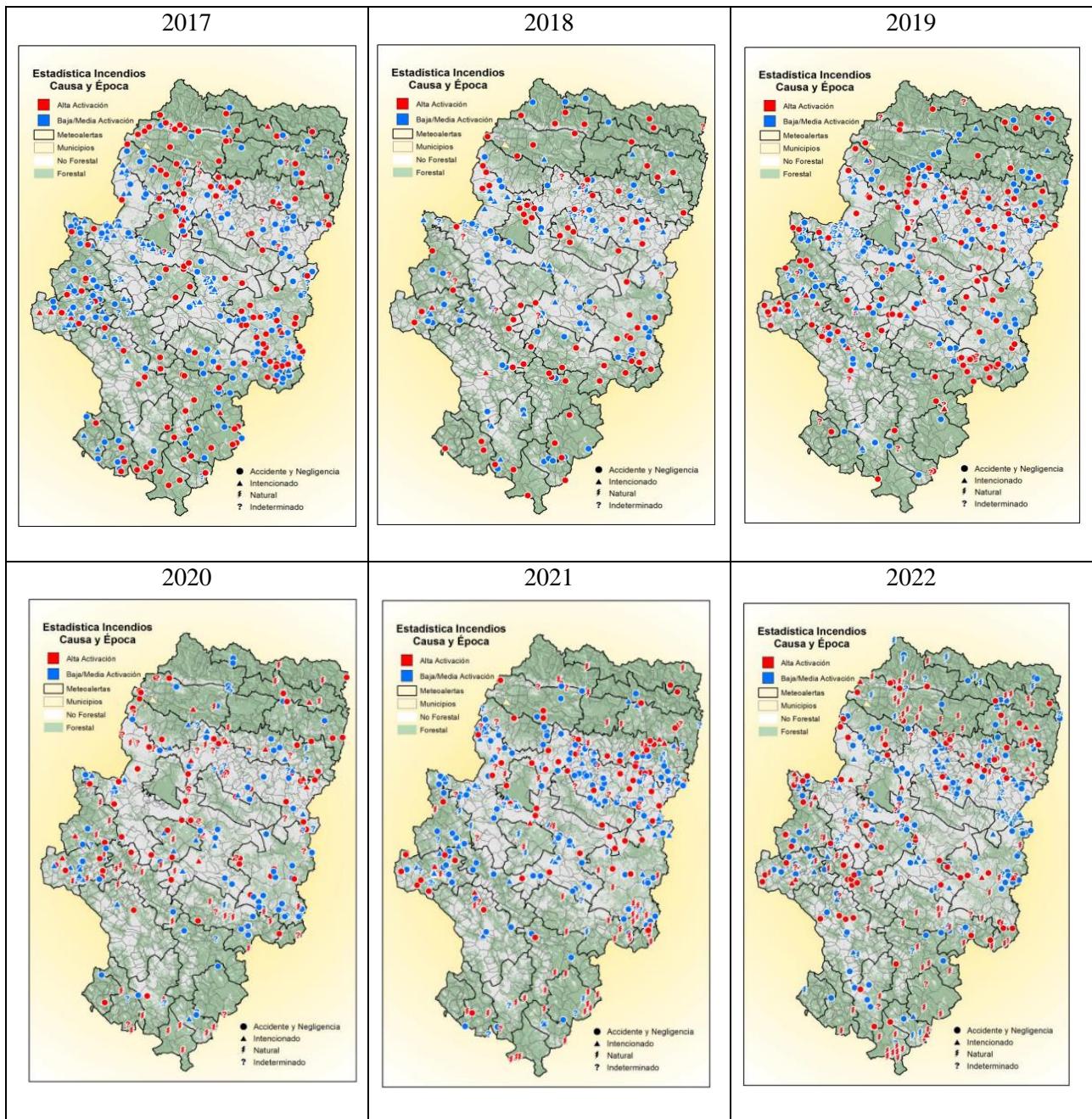


Figura 3: Estadística de incendios forestales en Aragón. Fuente: Gobierno de Aragón.

3. METODOLOGÍA

La modelización de incendios forestales responde a una necesidad cada vez mayor para conseguir estimaciones espaciales del potencial de incendios forestales; para satisfacer esta necesidad, se ha desarrollado un enfoque de modelización basado en simulación de la propagación del fuego mediante el cual se modelizan múltiples incendios forestales individuales (saturando el paisaje con decenas de miles de incendios) de forma iterativa a lo largo de un paisaje para obtener medidas basadas en la localización de la probabilidad y el comportamiento del fuego (Parisien et al, 2019). Esta información puede ser utilizada con anterioridad al fenómeno, para evaluar riesgos, crear políticas de mitigación y proteger a la población, o de forma paralela al desarrollo del mismo para intentar prever su desarrollo y ayudar en la extinción del mismo

En este documento, se intenta responder a la cuestión de la importancia de la recuperación de espacios de cultivo abandonados y su papel en la prevención (o no) de este fenómeno. Adaptando la metodología establecida por Parisien et al (2019), se ha establecido el siguiente esquema de trabajo:

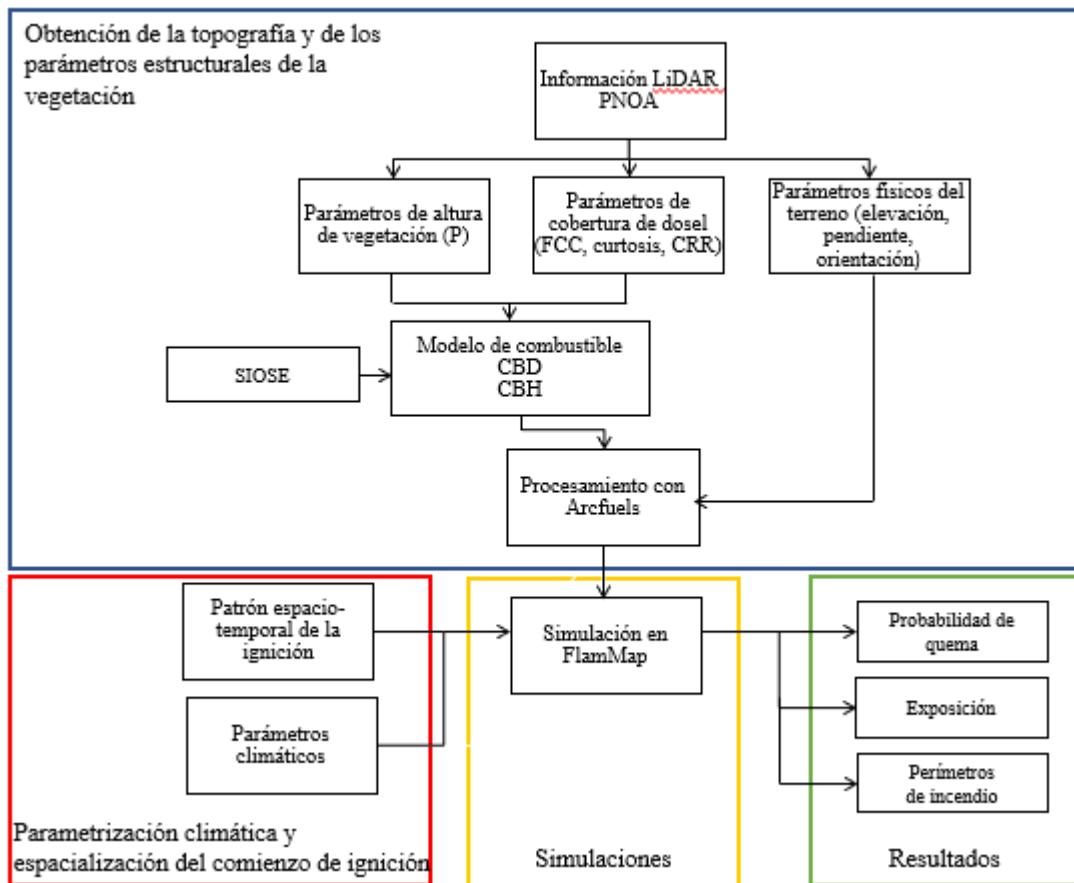


Figura 4: Esquema de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

En una primera fase se obtienen una serie de productos espacialmente distribuidos que reflejan las características del paisaje que son necesarios para la simulación del crecimiento simulado de los incendios. Se necesitan parámetros de combustible, de dosel y de topografía, además de la localización de las parcelas agrícolas abandonadas. Este punto se ha trabajado prácticamente en su totalidad con un script de R de Rodrigues (2018), del que más adelante se aportará información y que puede consultarse en el Anejo 1 del presente documento, teniendo de apoyo QGIS3.22.3 para la visualización de la información. Es el único punto del trabajo en el que ha sido necesario usar un software que no es de código abierto, ya que, para hacer la creación de la interfaz integrada de todos los parámetros se ha usado ArcFuels (<https://www.firelab.org/project/arcfuels>), que está integrado dentro de ArcMap.

La segunda fase consiste en el establecimiento de escenarios meteorológicos (dirección y velocidad dominante del viento) y de humedad del combustible (combustible fino muerto y vivo herbáceo y leñoso). Para este punto, se contará con datos de bibliografía, así como de toda la información generada con anterioridad.

El último paso previo a la simulación involucra la caracterización de los patrones de ignición. Los algoritmos de simulación requieren de la especificación de los puntos origen de la ignición. Esta información se genera habitualmente a partir de nubes de puntos espacializadas aleatoriamente en el paisaje. En este caso, se ha optado por ponderar dicha espacialización mediante información sobre la probabilidad de ocurrencia de incendios.

En la última etapa se llevan a cabo las simulaciones de propagación (antes y después del abandono) utilizando el software FlamMap 6.0 (Finney 2006), integrado toda la información elaborada previamente. Este proceso tiene como resultado los mapas de probabilidad de quema, valores de exposición del territorio y perímetros de incendio producidos para los distintos escenarios que se van a plantear, con el objetivo de reflexionar y sacar conclusiones fundamentadas sobre la relación existente entre el fenómeno del abandono agrícola y los incendios forestales.

3.1. Obtención de la topografía y de los parámetros estructurales de la vegetación

Para la realización del presente trabajo, se contó con la información de la segunda cobertura LiDAR realizada dentro del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) recopilado y distribuido por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). El citado producto cuenta con una densidad 0.5 - 2 retornos por m², lo que concuerda con lo planteado en White et al (2013) donde se fija en 1 pulso/m² la densidad mínima para que un inventario forestal basado en esta tecnología resulte operativo.

Dado que la intención es el estudio de la probabilidad de incendio en la Comarca del Matarraña, se considera una zona “tampón” de 10 km por la ocurrencia de incendios que puedan “entrar” desde fuera de la comarca. Una vez generado el buffer, en QGIS, se utilizará este polígono para la localización de todos los archivos .laz comprendidos dentro de la zona de estudio y se procede a bajarlos para poder trabajarlos. En la figura 5 se aprecia la relación de tamaños de los polígonos mencionados.

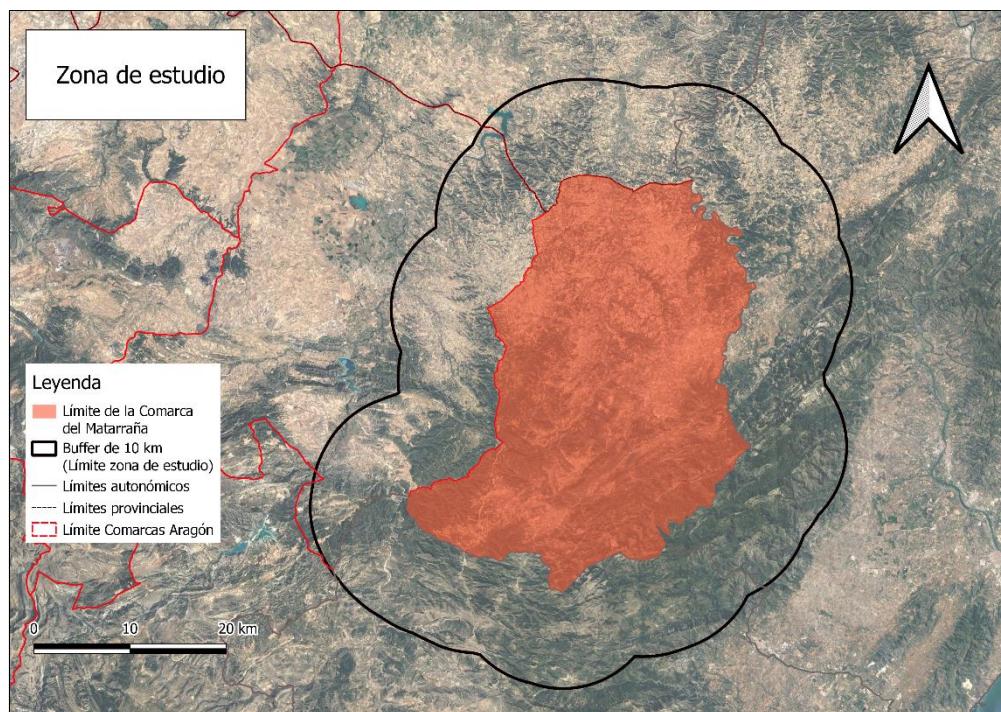


Figura 5: Límite de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Una particularidad importante a tener en cuenta a la hora de trabajar con la información LiDAR, es que la zona de estudio está comprendida entre dos Husos de la Proyección UTM ETRS89, el Huso 30 y el Huso 31. La información final se va a presentar en el Huso 30, por lo que será necesario un proceso de reproyección de los archivos que no estén en el mismo. Las métricas de los archivos LiDAR se han obtenido mediante un script desarrollado en R modificado de Rodrigues (2018), con la siguiente relación:

Parámetros de altura de la vegetación: Para estos parámetros se han filtrado las clases 2, 3, 4, 5, y 8 (2 y 8 corresponden a retornos de suelo; 3, 4 y 5 corresponden a retornos en la vegetación) de los archivos LiDAR.

- Altura de la vegetación: la altura de la capa superior de vegetación; se ha considerado la altura de 4 metros como la frontera entre arbóreo y arbusto, así como 2 metros como la frontera entre arbusto y herbácea; se sacarán dos percentiles asociados a esta medida. La unidad de medida son metros.
 - P95: se recupera la altura del 5% de la capa superior del dosel. A partir de esta medida, posteriormente se obtuvieron las zonas de alturas mayores de 4 metros (masa arbórea), entre 2 y 4 metros (matorral) e inferior a 2 metros (herbáceas).
 - P20: se recupera la altura del 80% de la capa superior del dosel.

Parámetros de cobertura de dosel: Para estos parámetros se han filtrado las clases 2, 3, 4, 5, y 8 de los archivos LiDAR.

- Fracción de cobertura del dosel (FCC por sus siglas en inglés): una medida de la densidad de la vegetación expresada en tanto por ciento. La cobertura del dosel desempeña un gran papel en la cantidad de luz solar que llega al suelo del bosque. Cuando se permite la penetración de una gran cantidad de luz solar en áreas del dosel, puede llegar a desarrollarse un denso sotobosque. Como resultado de un dosel pesado o denso, muy poca cantidad de luz solar llegará hasta el suelo del bosque, y, por consiguiente, el sotobosque será escaso. Las medidas adquiridas de este parámetro han sido:
 - Alturas mayores de 4 metros, para obtener el porcentaje de cobertura arbórea ($FCC_{>4}$)
 - Alturas menores de 4 metros, para obtener el porcentaje de cobertura herbácea y de matorral ($FCC_{<4}$)
 - Alturas mayores de 3 metros, como sustitutivo al parámetro PFRAM que se explicará más adelante ($FCC_{>3}$)
- Relación de relieve del dosel (CRR por sus siglas en inglés): es un descriptor cuantitativo de la forma relativa del dosel a partir de la observación altimétrica (Parker y Russ, 2004), definida como los retornos de la altura media menos la altura mínima dividida por la altura máxima menos la altura mínima. Se trata pues de un indicador de la variabilidad local en la densidad del dosel de la vegetación, cuanto más se acerque su valor a 1, más homogénea será esta. Es un parámetro adimensional.
- Curtosis: Es una medida estadística que determina el grado de concentración que presentan los valores de una variable en la región central de la distribución, refleja la cantidad de valores atípico en una muestra, es adimensional. Para una distribución normal, la curtosis será cero, si es positiva indica que los datos muestran una gran concentración de valores en torno a la media mientras que si es negativa indica que esta concentración es menor que una distribución normal. Este parámetro se ha obtenido para 3 intervalos distintos:
 - Curtosis entre 0 y 3,8 metros ($Kurt_{0-3,8}$)
 - Curtosis entre 2 y 8 metros ($Kurt_{2-8}$)
 - Curtosis entre 6,7 y 14 metros ($Kurt_{6,7-14}$)

Parámetros físicos del terreno: Para estos parámetros se han filtrado las clases 2 y 8 de los archivos LiDAR.

- Elevación: se trata de la elevación del terreno con alturas normalizadas. La unidad de medida son metros
- Pendiente: a partir de la información de la elevación se han generado las pendientes en porcentaje
- Orientación: a partir de la información de la elevación, se han obtenido, en grados, las orientaciones de las laderas.

3.1.1. Definición del Modelo de Combustible de superficie

Los modelos de combustible (MC) son estructuras de vegetación tipo a las que se les presupone un comportamiento frente al fuego conocido (carga de combustible, velocidad de propagación, intensidad de la quema,etc), lo que permiten predecir la evolución del fuego.

La definición del MC ha sido uno de los pasos más costosos de este proceso, partiendo de la clasificación de usos del suelo ofrecida por SIOSE, se realizó una comprobación visual con los valores obtenidos del manejo de datos LiDAR descargados del PNOA, a fin de afinar y corregir esta clasificación para asimilar toda la superficie de la zona de estudio a la clasificación de Scott y Burgan (2005) utilizada por el Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de Estados Unidos y que contempla 40 modelos (utilizados de manera habitual en las simulaciones con el software FlamMap), abarcando la variabilidad necesaria para representar el paisaje. Las métricas utilizadas para este proceso han sido: P95 (desglosada por altura de capa arbórea, arbustiva y herbácea), FCC ($FCC_{>4}$ y $FCC_{<4}$) y CRR.

En la figura 6, se puede observar la cartografía obtenida a través de la clasificación realizada, en la tabla que le sigue se puede apreciar la relación existente entre modelos de combustible

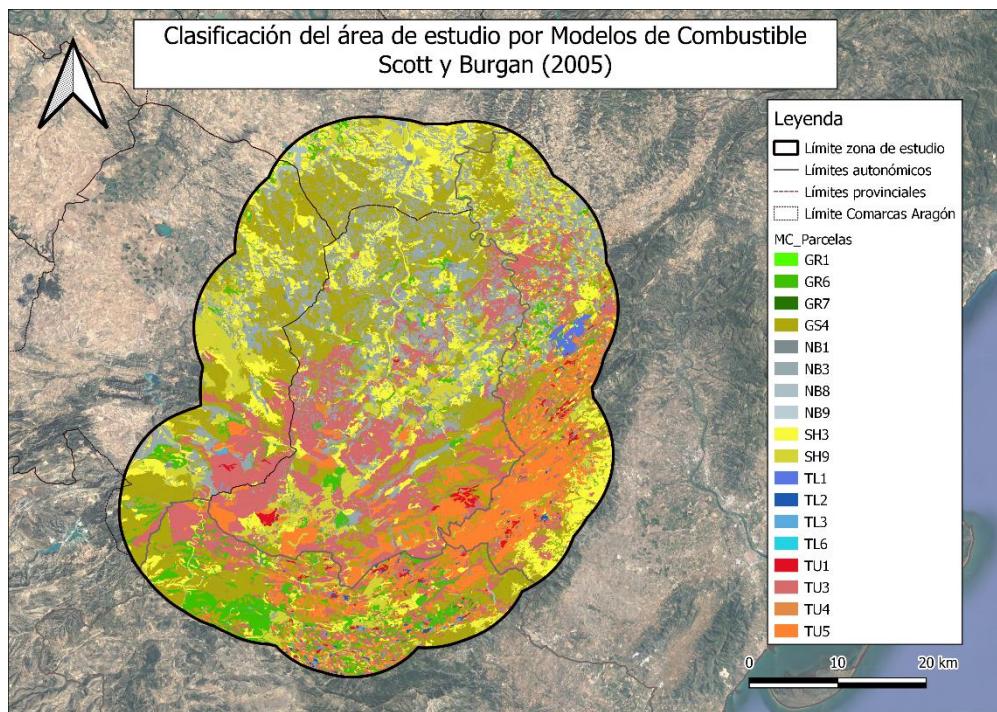


Figura 6: Clasificación de modelos de combustible. Fuente: Elaboración propia según la clasificación de Scott y Burgan, (2005).

Con un simple análisis visual se puede apreciar cómo el MC más abundante corresponde con el GS4, seguido por el TU3, siendo abundante también el SH3 esto concuerda con un sistema de cultivos abandonados en el que, poco a poco, la vegetación va cubriendo las zonas anteriormente antropizadas.

Para poder valorar la influencia que ha tenido el abandono de cultivos en la Comarca del Matarraña en la probabilidad de incendios de este área, se ha modificado el raster de modelos de combustible mediante una capa de parcelas abandonadas de Ric e Ibarra (2015). De esta forma, se les ha otorgado a las parcelas abandonadas el valor de 93 en el MC, correspondiente a “Zonas agrícolas y arrozales”. Con estas parcelas, se produce una reclasificación de más de 40 km² (4042,25 ha), lo que supone un 4,3% de la superficie de la Comarca del Matarraña.

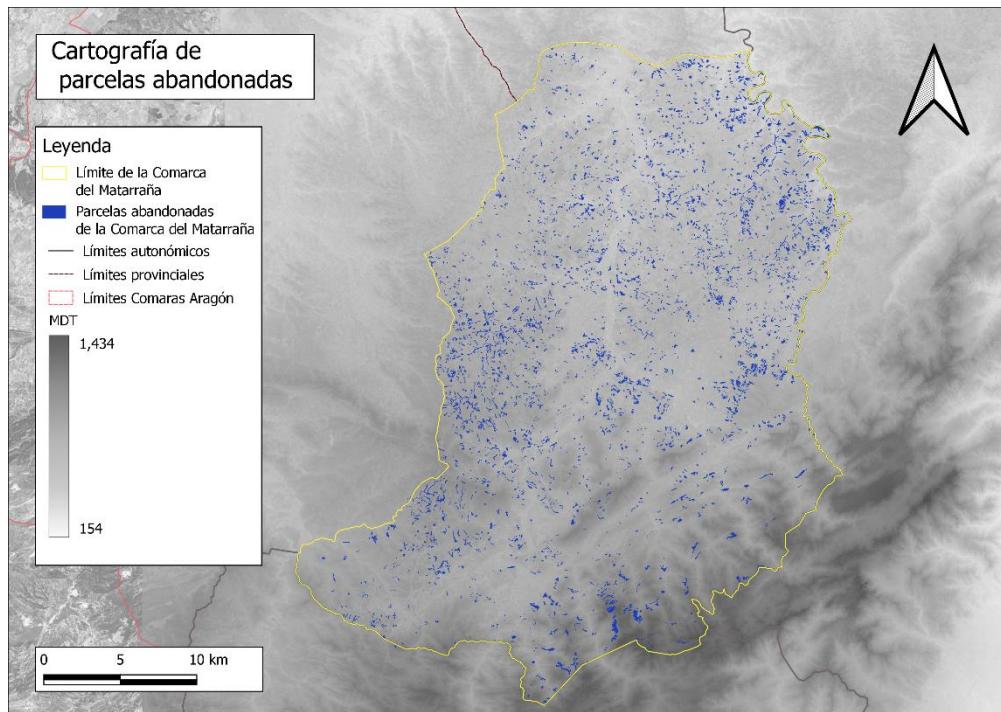


Figura 7: Parcelas de cultivo abandonadas cartografiadas en la Comarca del Matarraña. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1: Clasificación de modelos de combustible. Fuente: Elaboración propia.

MC	Descripción	Valor MC	Área en la situación actual (km ²)	Área en el supuesto de no abandono (km ²)	km ² cambio	% cambio
GR1	Hierba dispersa	101	0,14	0,14	0,00	0,00
GR6	Pasto continuo menor a 0,6 m	106	127,35	126,59	0,76	0,60
GR7	Pasto continuo en torno a 1 m	107	0,03	0,03	0,00	0,00
GS4	Hierba y los arbustos combinados	124	683,33	671,71	11,62	1,70
NB1	Suelo urbano, sub-urbano e industrial incombustible	91	24,84	24,74	0,10	0,40
NB3	Zonas agrícolas y arrozales	93	362,8	397,05	34,25	9,44
NB8	Agua	98	8,56	8,56	0,00	0,00
NB9	Suelo desnudo	99	0,01	0,01	0,00	0,00
SH3	Arbustos leñosos relativamente dispersos	143	375,77	368,63	7,14	1,90
SH9	Arbustos leñosos densos	149	261,99	258,50	3,49	1,33
TL1	Bosque recientemente quemado	181	8,2	8,2	0,00	0,00
TL2	Árbol perenne de hoja ancha	182	5,42	5,42	0,00	0,00
TL3	Coníferas	183	8,85	8,85	0,00	0,00
TL6	Árbol perenne de hoja ancha disperso	186	0,02	0,02	0,00	0,00
TU1	Baja carga de hierba y/o arbustos con hojarasca	161	17,14	17,10	0,04	0,23
TU3	Hojarasca forestal moderada con pasto y componentes de arbustos	163	454,83	445,23	9,6	2,11
TU4	Coníferas con hierba	164	1,4	1,35	0,05	3,57
TU5	Hojarasca forestal densa con un sotobosque de arbustos	165	274,86	273,41	1,45	0,53

3.1.2. Cálculo de Altura de la Base de la Copa (CBH) y de Densidad Aparente (CBD)

Además del modelo de combustible de superficie, las simulaciones permiten especificar una serie de parámetros del dosel con el fin de incorporar la propagación del fuego de copa. Se requiere información sobre la altura de la vegetación (P95) y el recubrimiento del dosel (FCC), ya descritos en el apartado 3.1. Además se requiere información sobre la altura de la base de la copa (canopy base height – CBH) (m), que es la distancia vertical desde la superficie de la hojarasca hasta la base de la copa de los árboles, considerando ésta como la inserción de las primeras ramas con acículas vivas (Arellano Pérez, 2021); y también de la densidad aparente del dosel (canopy bulk density – CBD) (kg m⁻³), que se define como la masa de combustible disponible por unidad de volumen del dosel (Arellano Pérez, 2021).

Para la obtención del CBH y el CBD se han utilizado las ecuaciones polinomiales basadas en relaciones empíricas específicas del dosel obtenidas por Botequim et al (2019). La autora establece una serie de ecuaciones polinómicas en función del tipo de vegetación (pinares y quercineas) para los distintos parámetros de cobertura de dosel a partir de relaciones empíricas entre inventario de campo e información LiDAR-ALS.

Para poder asimilar las ecuaciones de Botequim et al (2019) al área de estudio, se ha realizado un análisis de la zona de estudio utilizando el trabajo elaborado por el MITERD, Mapa Forestal de España a escala 1:50.000 (MFE50). (s. f.). Este mapa es la “cartografía de la situación de las masas forestales, realizada desde el Banco de Datos de la Naturaleza, siguiendo un modelo conceptual de usos del suelo jerarquizados, desarrollados en las clases forestales, especialmente en las arboladas.”

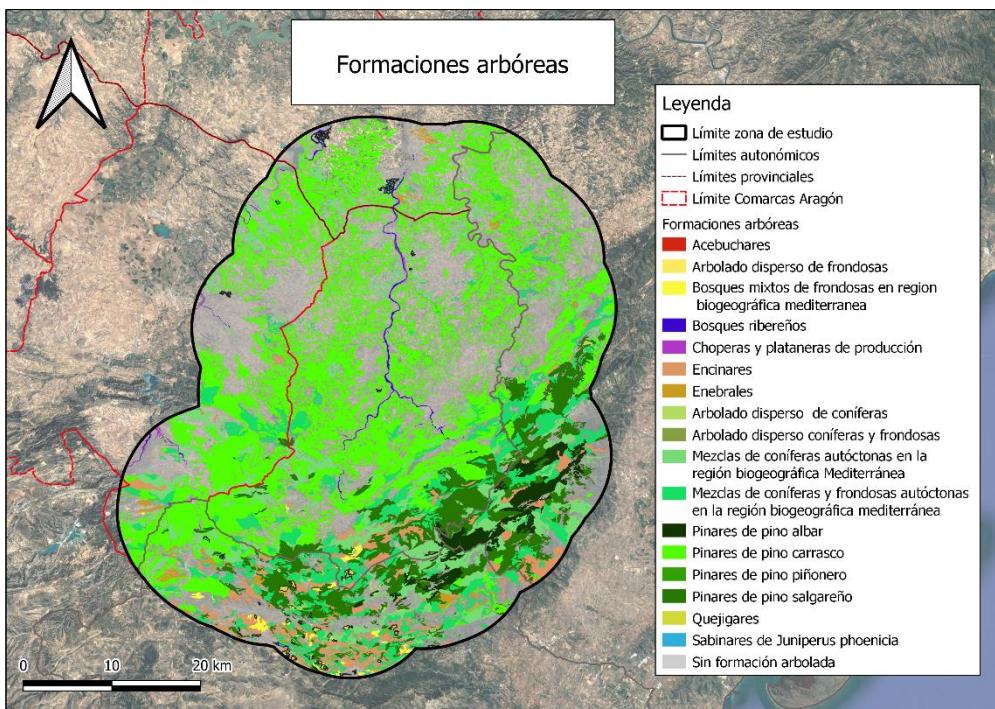


Figura 8: Clasificación de formaciones arbóreas. Fuente: Elaboración propia a partir de la información del MFE50

Tabla 2: Áreas de las especies arbóreas en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del MFE50

Nombre de la formación arbolada	Especies	Área (km ²)
Pinares de pino carrasco	<i>Pinus halepensis</i>	783,759
Mezclas de coníferas y frondosas autóctonas en la región biogeográfica mediterránea	Sin determinar	206,612
Pinares de pino salgareño	<i>Pinus nigra</i>	201,514
Mezclas de coníferas autóctonas en la región biogeográfica Mediterránea	Sin determinar	193,424
Encinares	<i>Quercus ilex</i>	90,33
Pinares de pino albar	<i>Pinus sylvestris</i>	53,836
Enebrales	<i>Juniperus spp.</i>	16,453
Bosques mixtos de frondosas en ispán biogeográfica mediterránea	Sin determinar	10,099
Bosques ribereños	<i>Populus alba</i> <i>Tamarix spp.</i> <i>Alnus glutinosa</i> <i>Salix spp.</i> Otros árboles ripícolas <i>Salix alba</i> <i>Salix atrocinerea</i> <i>Salix babylonica</i> <i>Salix ispánica</i> <i>Salix caprea</i> <i>Salix elaeagnos</i> <i>Salix fragilis</i> <i>Salix purpurea</i>	8,775
Quejigares	<i>Quercus faginea</i>	5,671
Arbolado disperso de coníferas	Sin determinar	3,759
Sabinares de <i>Juniperus phoenicia</i>	<i>Juniperus phoenicia</i>	3,662
Choperas y plataneras de producción	<i>Platanus ispánica</i> <i>Populus x canadensis</i>	2,885
Arbolado disperso coníferas y frondosas		0,595
Pinares de pino piñonero	<i>Pinus pinea</i>	0,358
Acebuchares	<i>Olea europaea</i> var. <i>Sylvestris</i>	0,070
Arbolado disperso de frondosas	Sin determinar	0,015

Según esta información, la masa arbolada mayoritaria en la zona de estudio es la de *Pinus halepensis* y *Pinus nigra*, por equiparación morfológica con las especies contenidas en el estudio de Botequim et al (2019), se han tomado los polinomios establecidos para *Pinus pinaster* (Pure maritime pine).

Tabla 3: Resumen de la predicción de variables y niveles de confianza para los parámetros CBH y CBD.
Fuente: Botequim et al (2019)

Parámetro	Variables	Estimación de coeficientes				R ²	RMSE	rRMSE(%)
		β ₀	β ₁	β ₂	β ₃			
CBH	P20							
	Kurt _{0-3,8}	1,0135	0,5368	-0,0306	0,2751	0,95	0,23	5,95
	Kurt _{6,7-14}							
CBD	P95							
	PFRAM	-0,0389	0,0063	-0,0054	0,0485	0,96	0,01513	13,38
	Kurt ₂₋₈							

Para el cálculo del CBH la ecuación queda de la siguiente manera:

$$CBH = 1,0135 + 0,5368 * P_{20} - 0,0306 * Kurt_{0-3,8} + 0,2751 * Kurt_{6,7-14}$$

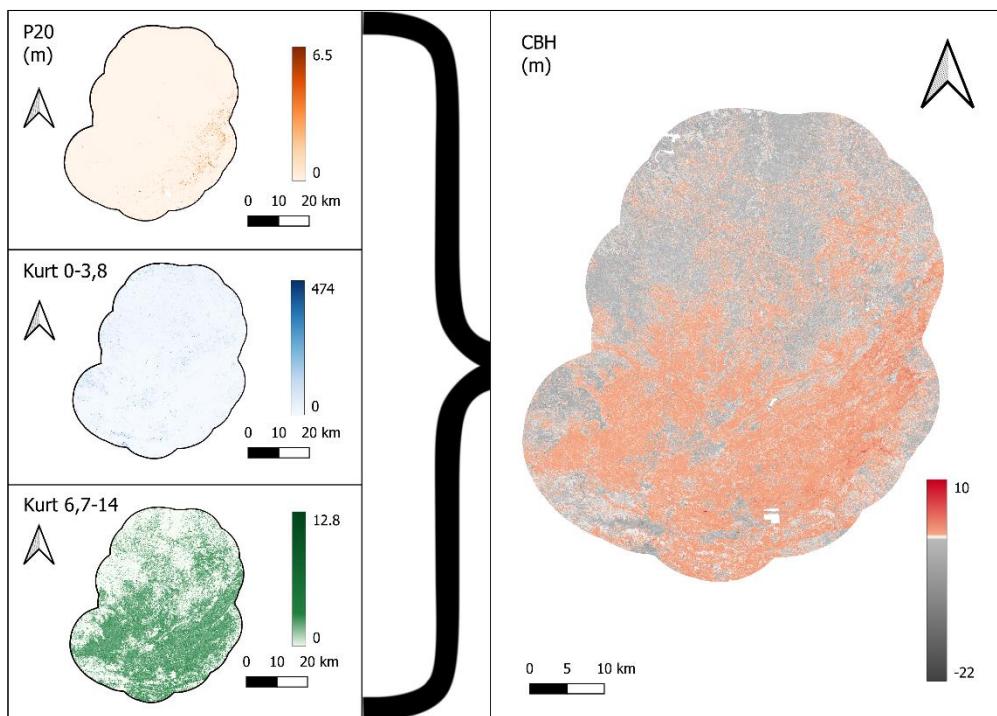


Figura 9: Distribución del CBH en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo del CBD, y ante la dificultad de calcular la media de cada uno de los píxeles para el cálculo del PFRAM tal y como establece Botequim et al (2019), se ha optado por sustituir este parámetro por la FCC de valores superiores a 3 metros, por considerarse esta altura el umbral del matorral boscoso de transición. De esta manera, es establece el siguiente polinomio para hallar el CBD de la zona de estudio:

$$CBD = -0,0389 + 0,0063 * P_{95} - 0,0054 * FCC_{>3} + 0,0485 * Kurt_{2-8}$$

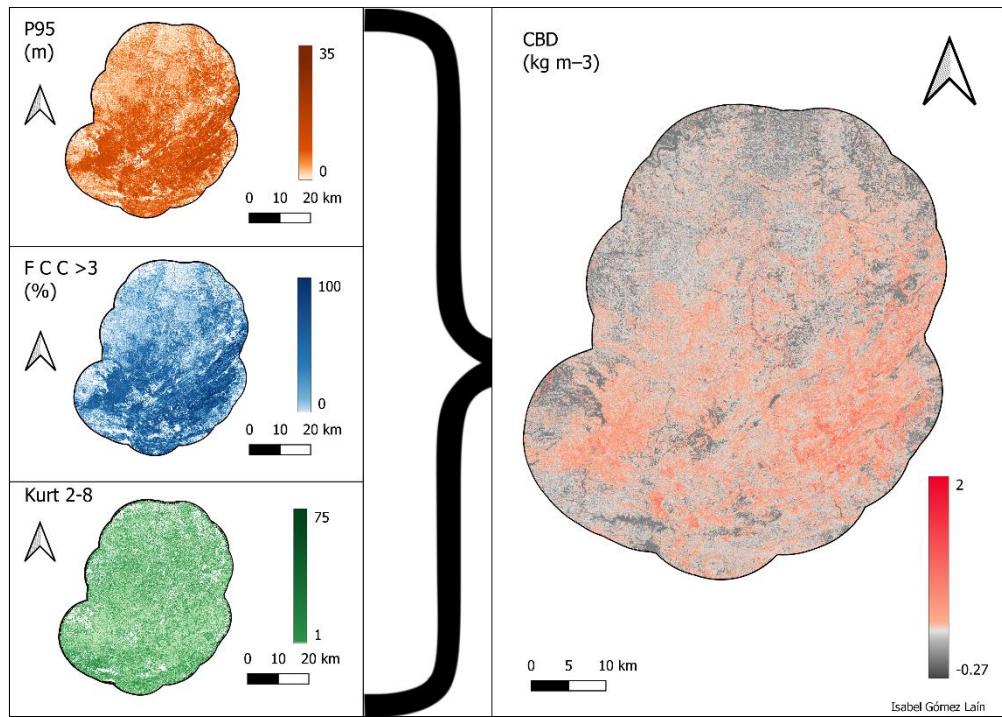


Figura 10: Distribución del CBD en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculados estos parámetros, ya se puede iniciar la modelización de los incendios.

3.1.3. Elaboración de escenarios de paisaje

Se han tenido en cuenta dos escenarios para cada una de las simulaciones que se han llevado a cabo. Como ya se ha mencionado, para poder sopesar la influencia del abandono en los incendios producidos en la zona de estudio, hay que tener en cuenta la situación ideal en la que este fenómeno no hubiera tenido lugar. Por esta razón, se generaron dos archivos base con la herramienta ArcFuels, la situación actual, con los modelos de combustible clasificados en función de los parámetros derivados del LiDAR y el SIOSE, y otra con estos modelos modificados, tal y como se explica en el punto indicado. Para la generación de los escenarios, se ha tomado un tamaño de malla de 100 metros, por considerarlo suficiente al nivel de escala que se está estudiando. ArcFuels se creó para agilizar el proceso de planificación de la gestión del combustible y proporcionar herramientas para la evaluación cuantitativa del riesgo de incendios forestales. Se trata de una barra de herramientas integrada en ArcMap que permite crear una interfaz transescala (Landscape) compatible con simuladores como FlamMap para el modelado del comportamiento de incendios forestales. La información introducida para la creación de los archivos de Landscape (.lcp) es la siguiente: Elevación sobre nivel del mar (m); Pendiente del terreno (%); Orientación de laderas (°); Modelo de combustible de superficie; recubrimiento del dosel (%); altura de la vegetación (m); CBH (m*10); CBD (kg/m³ *100).

En este punto, se han generado los dos archivos .lcp necesarios para los dos escenarios a modelizar para cada una de las simulaciones que se van a llevar a cabo.

3.2. Parametrización climática y espacialización del comienzo de ignición

3.2.1. Capa de puntos de ignición

Para poder replicar exactamente los puntos de ignición en cada una de las simulaciones para los distintos escenarios, se ha creado una capa de 20.000 puntos para introducirlo en el software como capa de puntos de ignición.

A partir de la capa de probabilidad de incendios obtenidos con datos históricos de Aragón (Chuvieco et al, 2010) y Cataluña (Rodrigues et al, 2022a), se ha generado un ráster de probabilidad de ignición de incendios antrópicos con una resolución común de 100 metros. Posteriormente, se ha

aplicado la herramienta “Create Spatially Balanced Points” para obtener la capa de 18.000 puntos de ignición. Al carecer de esta información para la provincia de Castellón (que linda al sur con la Comarca del Matarraña), se ha creado una capa de puntos aleatorios mediante la herramienta “Create Random Points” sobre la superficie de esta provincia para conseguir 2000 puntos que, añadidos a los puntos obtenidos de Aragón y Cataluña, se configura el archivo de 20.000 puntos de ignición para las simulaciones.

3.2.2. Contenido de humedad de combustible

Es necesario crear un archivo de humedad de combustible: cantidad de agua, expresada como un porcentaje del peso que tiene con respecto al peso seco del mismo. Ante la imposibilidad de hacerlo específicamente para este trabajo por falta de tiempo y carga de trabajo, se ha tomado como referencia el artículo de Alcasena et al (2019), en el que se realizó una subdivisión de la Comunidad Autónoma de Cataluña caracterizando la variabilidad del clima de incendios mediante una estación meteorológica automática representativa con una con una larga serie de datos en cada una de las subáreas. De esta forma, se consideraron las condiciones meteorológicas extremas condiciones meteorológicas extremas (es decir, el percentil 97) en términos del contenido de humedad del combustible (basado en el ERC-G, según Nelson 2000) para obtener los escenarios meteorológicos de modelización de incendios. Por cercanía con la zona de estudio, se han considerado para este trabajo los datos obtenidos para el área denominada Southern plain, caracterizada por medio de la estación meteorológica Ulldeolmols. Los datos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Datos de humedad considerados para crear el archivo de humedad de la zona de estudio. 1h, 10h y 100h corresponden al combustible fino muerto disponible para la quema en intervalos de 1, 10 y 100 horas respectivamente. Fuente: Alcasena et al (2019)

Subárea	Contenido de humedad				
	1 h	10 h	100 h	Vivo herbáceo	Vivo leñoso
Southern plain	6	7	9	15	50

El contenido de humedad considerado para el vivo arbóreo ha sido de 60, estipulando así unas condiciones muy extremas de bajo contenido de humedad.

3.2.3. Determinación de los parámetros de viento

Con todos los resultados obtenidos en los puntos anteriores, ya se dispone de la información necesaria para comenzar las simulaciones, a excepción de las condiciones de viento y los tiempos de incendio. Para las condiciones de viento, se toma en cuenta el documento del Gobierno de Aragón “Análisis del régimen de incendios y elaboración de escenarios meteorológicos por zona de meteoalerta de la Comunidad Autónoma de Aragón” (2015) en el que se divide la Comunidad en Zonas Homólogas, entendiendo como tales áreas con características similares. En la zona de estudio se encuentran tres zonas homólogas que se describen a continuación, para cada una de ellas se ha simulado la peor situación sinóptica en cuanto a número de ha quemadas eligiendo siempre el percentil 90 de módulo de viento, tanto para el escenario actual como para el escenario sin abandono agrícola.

3.2.3.1. Zona Homóloga del Valle del Ebro

Situada en el piso mesomediterráneo, con un amplio rango de altitudes y diversos ambientes y ombroclimas; las formaciones arbóreas existentes son masas de *Pinus halepensis*, en ocasiones poco vigorosas alcanzando mayor desarrollo en el extremo oriental donde llegan a formarse masas mixtas con *Quercus ilex*; en el estrato arbustivo podemos encontrar especies como *Quercus coccifera* y varias

especies del género *Juniperus*. Esta Zona Homóloga se caracteriza por dos direcciones dominantes de propagación, E-SE, provocada por el bochorno y NO, provocada por el cierzo, que hacia la parte oriental va perdiendo humedad relativa.

3.2.3.1.1. Zona de meteoalerta Bajo Ebro Forestal (BEF)

Dentro de esta Zona Homóloga se encuentra la Zona de meteoalerta del Bajo Ebro Forestal, cuya parte más suroriental coincide con la zona de estudio este trabajo. Durante el periodo 1971-2013 se ha producido la quema de 7596 ha en esta zona de meteoalerta, en incendios superiores a 50 ha, cuya relación se muestra en la tabla 5.

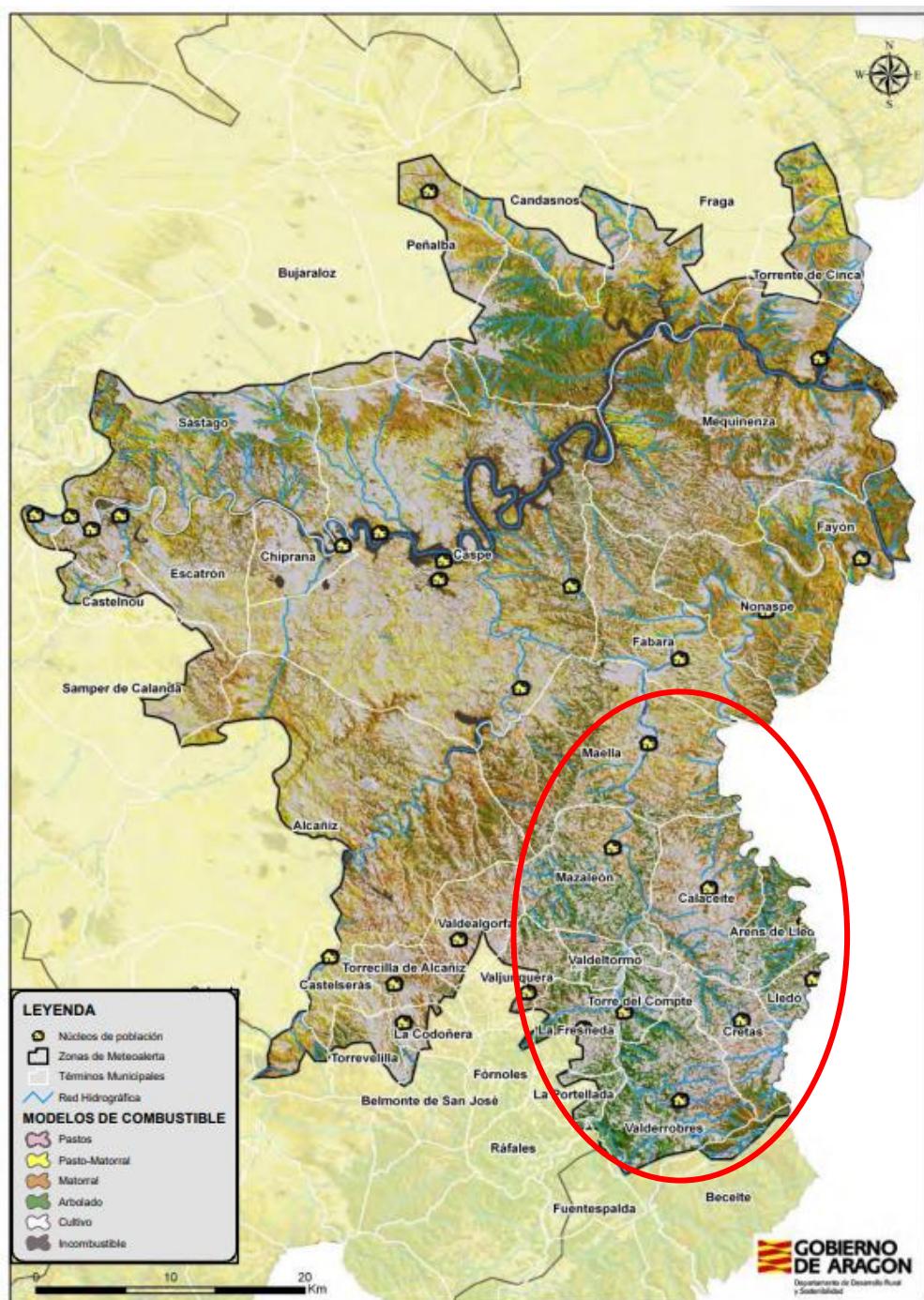


Figura 11: Zona de meteoalerta Bajo Ebro Forestal (BEF). El círculo rojo engloba la zona que corresponde a la zona de estudio del presente documento Fuente: Modificado del Gobierno de Aragón.

Tabla 5: Número de incendios y superficie quemada por SS en BEF, atendiendo únicamente a siniestros ≥ 50 ha. Fuente: Gobierno de Aragón.

Situación sinóptica	Nº de incendios	Superficie quemada
Situaciones de masa de aire	6	1668
Situaciones del SO con difluencia	4	522
Situaciones del SO sin difluencia	7	795
Situaciones del oeste	7	3183
Situaciones de ondas larga del NO	8	1378

En esta tabla se puede observar que la situación sinóptica (SS) con mayor relación superficie quemada/nº de incendios es la denominada como “Situaciones del oeste”; el documento indica que los incendios más peligrosos en esta configuración suelen provenir de la componente O-NO. Se trata de incendios guiados principalmente por viento, aunque con el combustible suficientemente disponible podrían existir comportamientos de tipo convectivo.

Para esta simulación los parámetros de velocidad de viento y dirección elegidos son los siguientes:

Tabla 6: Datos de viento para la situación sinóptica simulada. Fuente: Gobierno de Aragón.

Situación sinóptica	Dirección de viento	Velocidad de viento
Situaciones del oeste	315 °	27 km/h

3.2.3.2. Zona Homóloga Somontano Sur- Beceite

Con altitudes que oscilan entre 500 y 1100 m de altitud, se trata de una zona con relieve muy abrupto, perteneciente al piso bioclimático mesomediterráneo, con formaciones arbóreas dominadas por *Quercus ilex* y *Pinus halepensis*; en el estrato arbustivo podemos encontrar especies como *Quercus coccifera* y varias especies del género *Juniperus*. En cuanto al régimen de vientos, tanto en la zona de Beceite como en la parte más oriental del Somontano sur, se produce un dominio de vientos del SE. Los incendios van a propagarse o por viento o ayudados por la topografía, pudiendo presentar propagación convectiva si hay suficiente combustible disponible.

3.2.3.2.1. Zona de meteoalerta Somontano Sur (SMSR)

Dentro de esta zona de meteoalerta, la zona más oriental está incluida en el área de estudio de este trabajo; los datos históricos recopilados indican que se han quemado un total de 8711 ha en incendios superiores a 50 ha quemadas en las siguientes situaciones sinópticas.

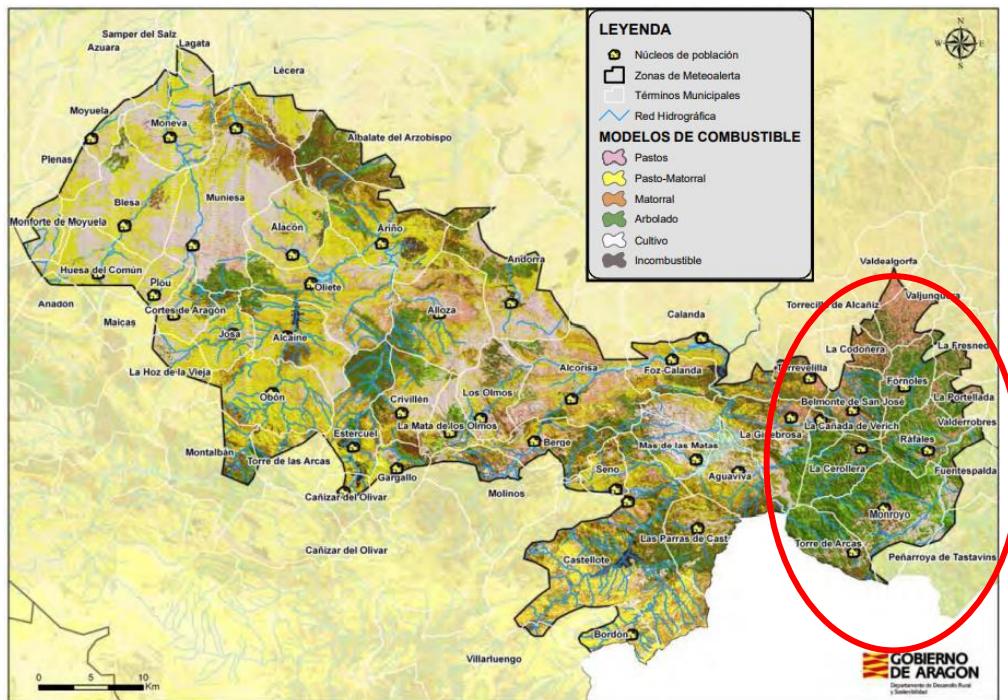


Figura 12: Zona de meteoalerta Somontano Sur (SMSR). El círculo rojo engloba la zona que corresponde a la zona de estudio del presente documento. Fuente: Modificado del Gobierno de Aragón.

Tabla 7: Número de incendios y superficie quemada por SS en SMSR, atendiendo únicamente a siniestros ≥ 50 ha. Fuente: Gobierno de Aragón.

Situación sinóptica	Nº de incendios	Superficie quemada
Situaciones del SO con difluencia	4	5741
Situaciones del SO sin difluencia	3	1711
Situaciones del oeste	1	635
Situaciones de ondas larga del NO	3	624

En esta tabla se puede observar que la situación sinóptica (SS) con mayor relación superficie quemada/nº de incendios es la denominada como “Situaciones del SO con difluencia”; en este contexto, el documento del Gobierno de Aragón indica que los vientos dominantes para esta situación son de componentes E-NE y que los incendios pueden estar apoyados por la topografía.

Para esta simulación los parámetros de velocidad de viento y dirección elegidos son los siguientes:

Tabla 8: Datos de viento para la situación sinóptica simulada. Fuente: Gobierno de Aragón.

Situación sinóptica	Dirección de viento	Velocidad de viento
Situaciones del SO con difluencia	45 °	22 km/h

3.2.3.2.2. Zona de meteoalerta Beceite (BCT)

Para esta zona las especies arbóreas dominantes en la zona son el *Pinus nigra* y el *Pinus halepensis*. Únicamente se tienen datos de un incendio superior a 50 ha quemadas en esta zona, por lo que será esta situación la que se simule. Se trata de una situación con vientos de componente SE en la que pueden llegar a producirse incendios de tipo convectivo si hay suficiente combustible disponible.

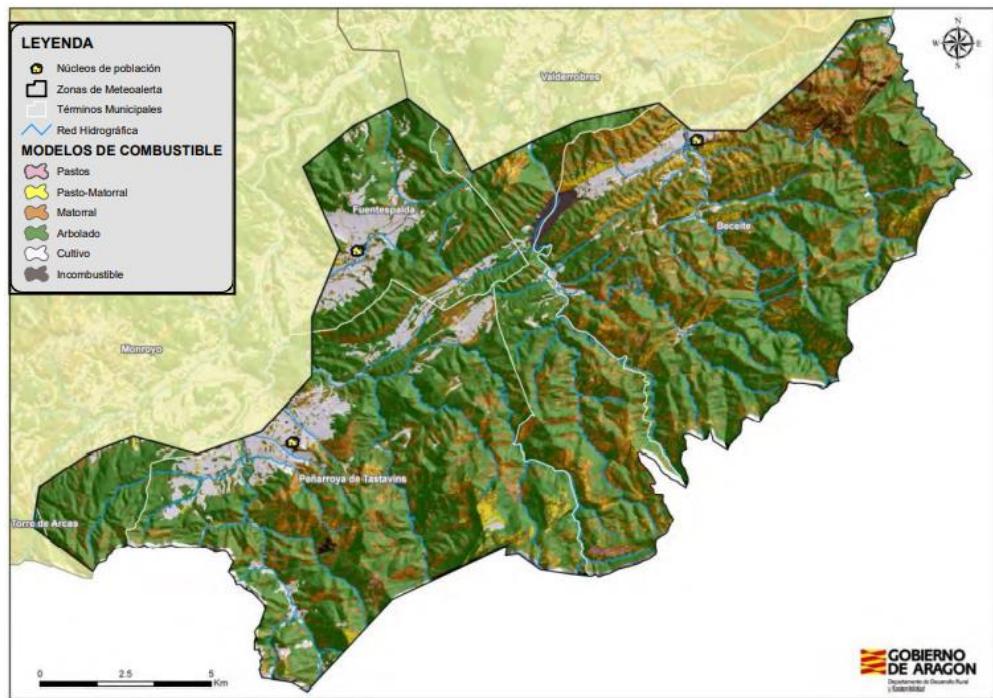


Figura 13: Zona de meteoalerta Beceite (BCT) Fuente: Modificado del Gobierno de Aragón.

Tabla 9: Número de incendios y superficie quemada por SS en SMSR, atendiendo únicamente a siniestros ≥ 50 ha. Fuente: Gobierno de Aragón.

Situación sinóptica	Nº de incendios	Superficie quemada
Situaciones del SO sin difluencia	1	110

Tabla 10: Datos de viento para la situación sinóptica simulada. Fuente: Gobierno de Aragón.

Situación sinóptica	Dirección de viento	Velocidad de viento
Situaciones del SO sin difluencia	135 °	27 km/h

3.3. Simulaciones

Con toda la información obtenida en los puntos anteriores, ya se dispone de la información necesaria para comenzar las simulaciones, se ha utilizado el software FlamMap 6.0, que describe el comportamiento potencial del fuego para condiciones ambientales constantes; los cálculos del comportamiento del fuego se realizan de forma independiente para cada celda de la malla (Finney, 2006). Se utilizará el algoritmo MTT (Minimun Travel Time) descrito por Finney (2002) para la generación de incendios, cargando la capa de puntos de ignición creada anteriormente para poder repetir con exactitud la simulación en ambos escenarios y estableciendo los parámetros de dirección y velocidad de viento seleccionados en el punto anterior. El programa cuenta con la opción de activar un parámetro denominado “Wind Ninja”, que calcula campos de viento variables para incendios forestales que requieren una predicción del viento de alta resolución en terrenos complejos.

Para los tiempos de simulación de incendios, se tomará el determinado por Alcasena et al (2019) para la zona anteriormente comentada. Así pues, se calcularán 105 minutos con una generación de ascuas o *spotting* del 0,01% (este parámetro establece la probabilidad de que la proyección de una ascua de un incendio cree otro). En total se han simulado 3 situaciones sinópticas con dos escenarios en cada una de ellas, una vez realizadas se analizan los resultados en el punto 4.

Las simulaciones de FlamMap revierten gran cantidad de información para analizar. En este caso, se va a analizar por un lado los archivos de probabilidad de incendio (BP) y, por otro, los perímetros de

incendios provocados por cada uno de los 20.000 puntos de ignición hallados con anterioridad. Al haber simulado 3 situaciones sinópticas distintas para cada uno de los escenarios, se han aplicado unos pesos en función de la superficie quemada real en cada una de ellas para crear un archivo único por escenario; en la tabla que viene a continuación pueden consultarse los pesos otorgados a cada situación.

Tabla 11: Pesos otorgados a cada escenario calculado para hallar el escenario final. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Gobierno de Aragón.

Situación sinóptica	Nº de ha quemadas	Pesos otorgados (%)
Situaciones del SO sin difluencia (SO _{SD})	110	1,22
Situaciones del SO con difluencia (SO _{CD})	5741	63,55
Situaciones del oeste (O)	3183	35,23

La ecuación utilizada para este cálculo es la siguiente:

$$\text{Escenario} = \text{SO}_{\text{SD}} * 0,0122 + \text{SO}_{\text{CD}} * 0,6355 + \text{O} * 0,3523$$

Una vez obtenida esta cartografía, se realiza un análisis estadístico en R (puede consultarse en el Adjunto 2 del presente documento) para obtener media y mediana de la variación producida entre los distintos escenarios. Por un lado, se calculan parámetros de riesgo de transmisión de incendios utilizando la capa 0507S_EDIFIC (capa de edificación) de la Base Topográfica Nacional (BTN) en función del porcentaje de BP extraído del escenario actual menos el escenario sin abandono agrícola.

Por otro lado, se va a analizar el área expuesta, tanto en términos de % de cambio de BP como en términos de variación de la superficie (es decir, porcentaje de la superficie de la Comarca que presenta cambios, sin contabilizar el nivel de cambio). Por último, se van a comparar las superficies de los perímetros de incendio para poder analizar su variación en los distintos escenarios.

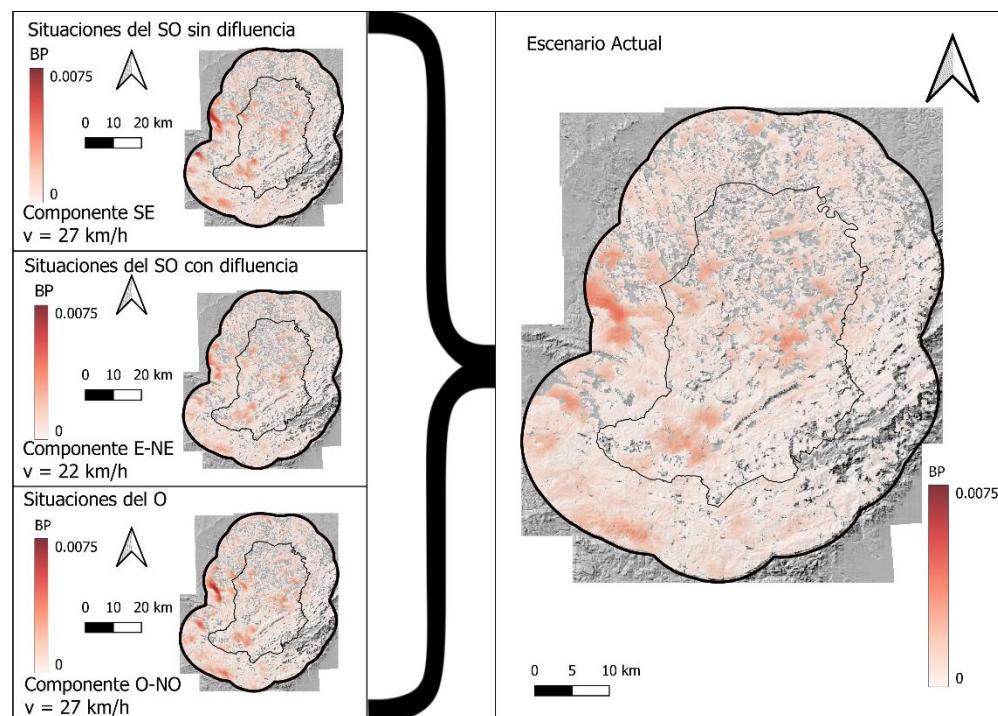


Figura 14: Parcelas de cultivo abandonadas cartografiadas en la Comarca del Matarraña. Fuente: Elaboración propia.

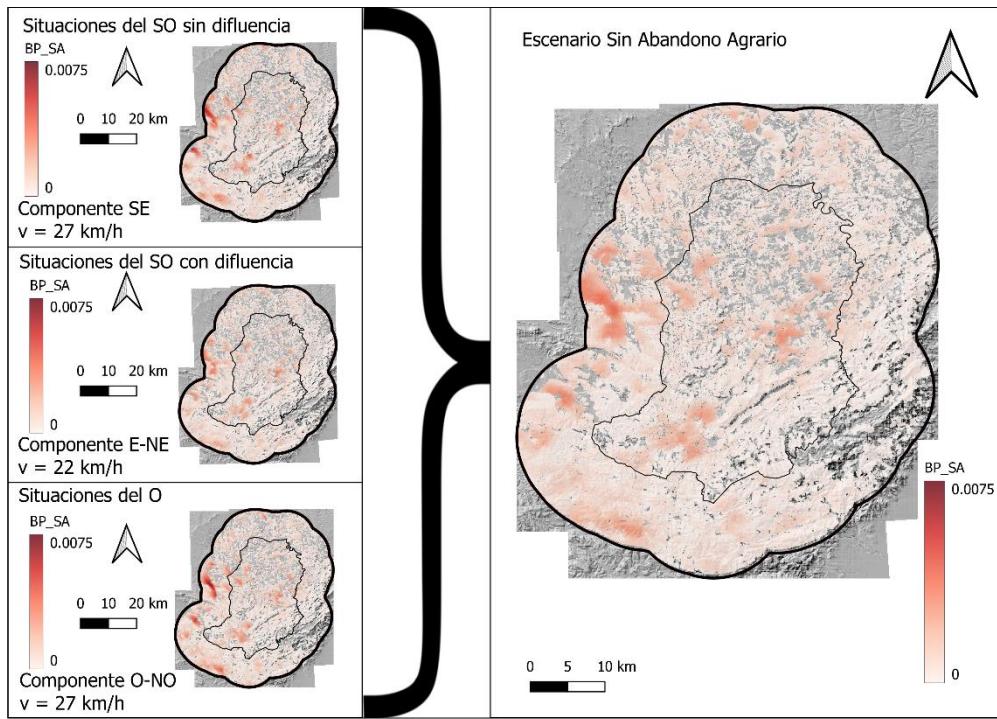


Figura 15: Cálculo del escenario sin abandono agrario (ESAA) a partir de los pesos otorgados, la línea gris marca el límite de la Comarca del Matarraña. Fuente: Elaboración propia.

4. RESULTADOS

4.1. Patrones espaciales de probabilidad de quema

La mayor tasa de cambio en los modelos de combustible como resultado del abandono (Tabla 1) se da en los modelos TU3, cuya variación es del 2, 11%, y SH3, que varía en un 1,90% su superficie, seguidos por GS4, con una tasa del 1,70%; esto coincide con lo expuesto en el punto 3.1.1 sobre los modelos resultantes como consecuencia de los efectos del abandono. Entre todas las cubiertas se produce un cambio de modelo de combustible del 9,44%, lo que corresponde a una superficie de 34,25 km².

Los resultados de la simulación de situaciones sinópticas (Figura 16) muestran unos patrones generales con independencia de las condiciones climáticas modelizadas. Parece haber una concentración de valores altos de BP en 5 áreas de la zona de estudio; dos de estas áreas se sitúan en la zona central de la Comarca del Matarraña, otra al oeste, lindando con el límite de la zona de estudio, una cuarta al sur del límite de la Comarca del Matarraña y la última al sur de la zona de estudio. De estas áreas, la zona del sur, perteneciente a la provincia de Castellón, ha sido la única cuyos focos de ignición no están basados en datos históricos, por lo que su lectura no está tan clara. El resto de las zonas sí parecen justificarse por una clara influencia de la topografía. En cuanto a la intensidad, se observa que ambos escenarios de la situación SO sin difluencia presentan valores bastante altos, esta situación responde a vientos de componente SE, es decir, Bochorno. Las situaciones con difluencia, sin embargo, presentan valores más bajos, sobre todo en la zona oeste pegada al límite de la zona de estudio. Por último, las situaciones del Oeste (cierzo con bastante pérdida de humedad relativa) presentan también valores bastante altos en la zona oeste ya mencionada, siendo más moderados en el resto de áreas.

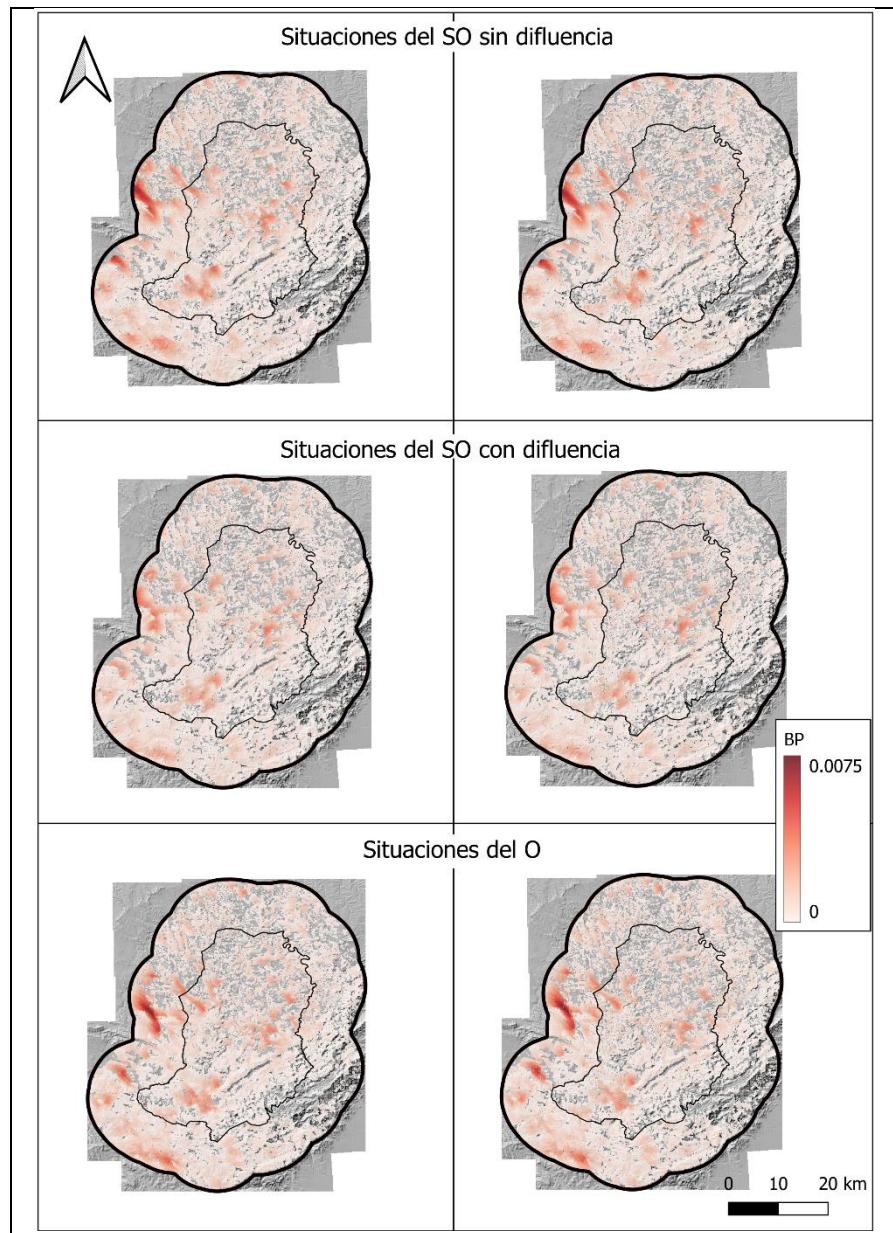


Figura 16: Resumen de los resultados de la simulación de situaciones sinópticas por escenarios, la línea gris marca el límite de la Comarca del Matarraña. Fuente: Elaboración propia.

La cartografía de probabilidad de quema (BP, *burn probability*) revela un patrón espacial claro con cierta independencia del escenario simulado (Figura 17). Se perciben 3 zonas principales con mayor probabilidad, dos situadas en la zona central de la Comarca y una tercera en el extremo sur. Esta distribución se observa en los escenarios con y sin abandono, lo que sugiere que el patrón espacial de BP es independiente de las zonas abandonadas, y más dependiente de la orografía del terreno si bien, como veremos más adelante, la magnitud de la probabilidad y de los eventos simulados sí se ven afectados por la presencia de vegetación en zonas previamente cultivadas.

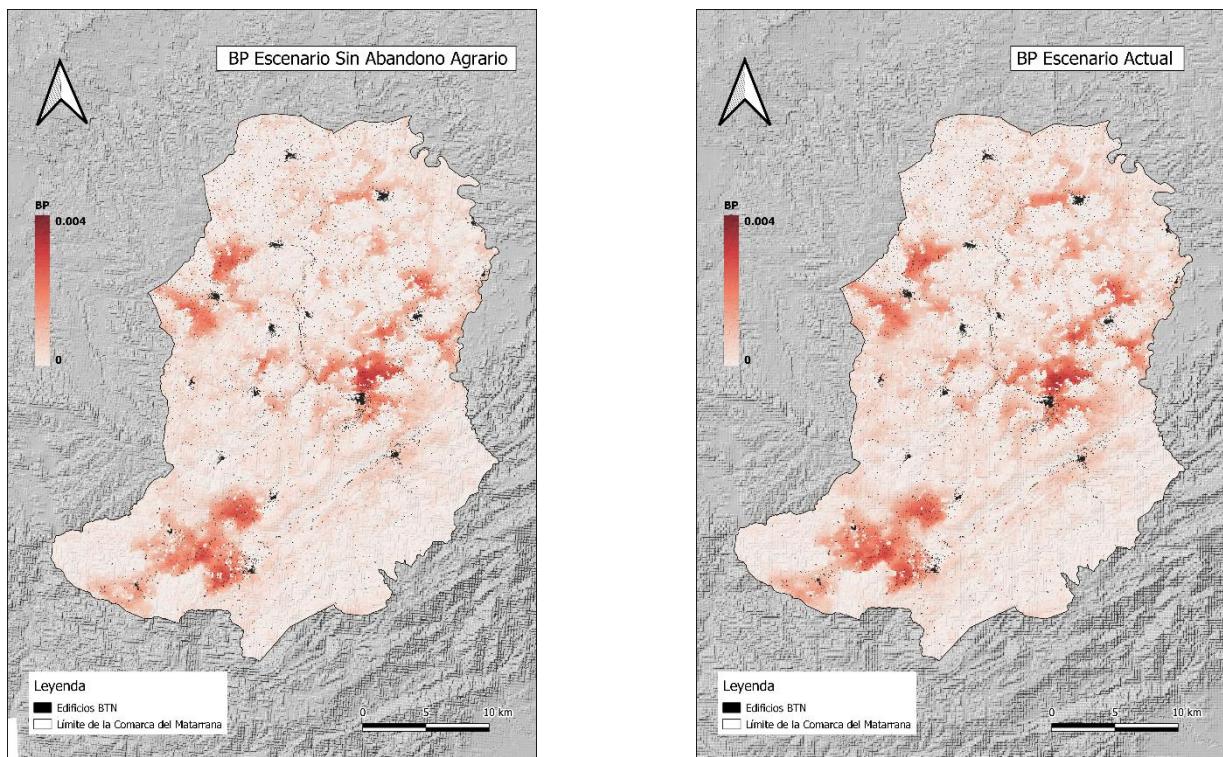


Figura 17: Cálculo las diferencias entre los distintos escenarios. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Cambios en la superficie afectada por el fuego y el tamaño de los incendios simulados

Si se hace un análisis de los datos derivados de los perímetros de los incendios generados se observa una disminución generalizada tanto de la superficie quemada como del tamaño de los incendios. Tal y como puede apreciarse en la Tabla 12, en cada una de las situaciones sinópticas se produce un aumento de los km² quemados afectados en el escenario actual (abandono agrícola) en un umbral cercano al 5%, llegando a darse diferencias de más de 0,5 km² en los perímetros. Hay que tener en cuenta, que se ha simulado un escenario de humedad relativa muy extrema con un escenario de mínimos en cuanto a duración de la propagación (105 minutos), por lo que el patrón espacial de estos focos corresponde casi únicamente a la orografía de la zona. El bajo porcentaje de la generación de ascuas (*spotting*) también recalca el factor de la topografía en los escenarios simulados. Además de esta información, se han calculado la media y la mediana de la disminución del tamaño de los perímetros de incendio; en la Tabla 12 puede observarse que, aunque en el tamaño medio no parece apreciarse una gran variación, en la mediana sí, por lo que los incendios grandes no van a variar demasiado su extensión, pero sí se ha producido un aumento considerable en la extensión de los incendios de menor entidad.

Tabla 12: N° de km² quemados para las situaciones sinópticas en los distintos escenarios. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Gobierno de Aragón.

Situación sinóptica	Nº de km ² quemados EA	Nº de km ² quemados ESAA	Nº de km ² de diferencia	%	% de incremento del tamaño del perímetro de incendio	% de incremento del tamaño del perímetro de incendio
					Media	Mediana
BCT	15.808,4	15.009,0	799,4	5,1	5,32	17,06
SMSR	13.211,1	12.,329,1	882,0	6,7	5,56	17,66
BEF	16.461,2	15.748,7	712,5	4,3	5,78	15,31
Total	45.480,7	43.086,8	2393,9	5,3	3,66	11,00

4.3. Cambios en la probabilidad de quema

Para poder comparar los resultados obtenidos con los cálculos realizados en el apartado anterior, se ha realizado una resta de las probabilidades de incendio entre el de no abandono agrario y el escenario conjunto actual (Figura 19). Se observa una clara tendencia al aumento de la probabilidad de incendios en la Comarca del Matarraña en los tres focos principales descritos en el apartado 4.1. Aproximadamente el 50% de la superficie de la comarca habría experimentado un incremento de BP. Esto quiere decir que la mitad de la superficie de la Comarca presenta cambios por el efecto del abandono en relación a la probabilidad de incendio, destacando el papel protector que las parcelas en cultivo ejercían sobre el paisaje antes de ser abandonadas. También se ha calculado el riesgo de transmisión con la capa de Edificación del BTN25, basado en el incremento de BP.

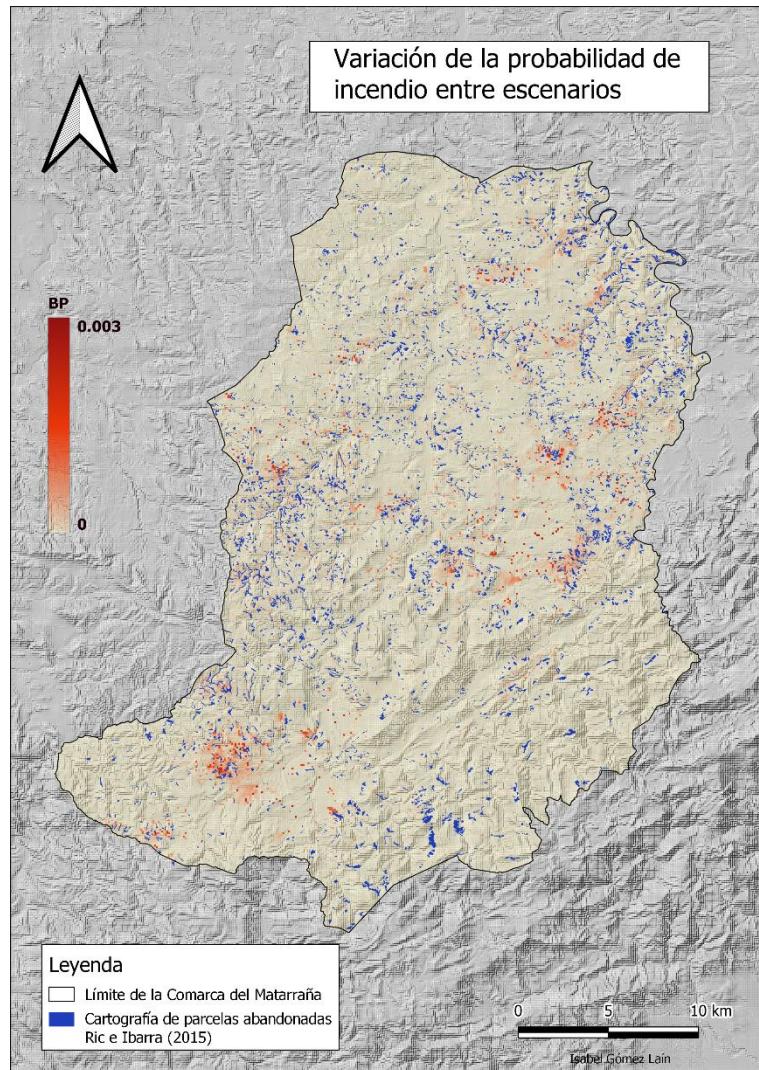


Figura 18: Variación de la probabilidad de incendio entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que hay una clara tendencia al aumento de la probabilidad de incendios en la Comarca del Matarraña, destacando la propagación del efecto del abandono en el paisaje con un incremento del BP promedio del 3,69% pero con un incremento más notable (14,0 %) en la mediana de BP en el conjunto de la Comarca. También se ha calculado el riesgo de transmisión (probabilidad de que el fuego llegue a zonas con infraestructuras) con la capa de Edificación de la Base Topográfica Nacional 1:25.000, basado en el incremento de BP. Los resultados arrojan una conclusión parecida a la obtenida del análisis de los perímetros simulados, con un incremento en la media de BP de los incendios que alcanzan edificios del 7,71% y una mediana del 14,0%.

Tabla 13: Resumen de las probabilidades calculadas de incremento entre una situación sin abandono agrario y la situación con abandono. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Gobierno de Aragón.

	Media	Mediana
% de incremento del tamaño medio del perímetro de incendio	3,66	11,00
% de incremento de la propagación del efecto del abandono en el paisaje	3,69	14,00
% de incremento en el riesgo de la propagación de transmisión de incendios	7,71	14,00

5. DISCUSIÓN

La estimación cuantitativa de la probabilidad de incendio y comportamiento potencial del fuego en cualquier punto del paisaje ha demostrado ser muy útil para los gestores del territorio. Conocer de antemano la probabilidad de que se produzca un incendio en cada punto del paisaje, así como el comportamiento potencial del fuego y el impacto de los incendios forestales proporciona una información básica -y necesaria- para mejorar la planificación, la mitigación y la adaptación en los paisajes propensos a los incendios paisajes propensos a los incendios (Parisien et al, 2019). A diferencia de los marcos conceptuales tradicionales para la evaluación del riesgo de incendio basados en el cálculo de indicadores agregados a partir de múltiples componentes (por ejemplo el definido en Chuvieco et al, 2014), los paradigmas basados en simulación de propagación se desarrollan de forma secuencial, partiendo de la caracterización del patrón de probabilidad de ignición que alimenta a la simulación de la propagación proporcionando una estimación de la probabilidad de quema que da soporte al cálculo de la exposición y la valoración de los impactos (pérdidas económicas, mortalidad en comunidades forestales, servicios ecosistémicos afectos, etc) (Jadhi et al, 2022). Se trata por tanto de una aproximación conceptualmente más sencilla que los esquemas habituales, que requieren de la definición de esquemas de integración específicos (por ejemplo, para integrar el potencial de propagación con la probabilidad de ignición o el componente de vulnerabilidad). La aproximación mediante simulación de propagación a escala de paisaje facilita además la comparación mediante la exploración de escenarios sobre posibles actuaciones, como la drástica reversión del abandono un número importante de parcelas agrícolas planteada en este estudio, o la evaluación del efecto de la gestión forestal en puntos estratégicos para la extinción abordada en Alcasena et al (2021).

El éxodo rural masivo hacia las grandes ciudades y las zonas industriales iniciado en el siglo XIX, seguido de la concentración parcelaria agrícola más la mecanización después de la segunda mitad del siglo XX desencadenó una rápida acumulación de combustible que fomentó una peligrosa continuidad de las masas forestales (Cervera et al, 2019). La modelización llevada a cabo en este trabajo ayuda a entender el efecto de la recuperación de las parcelas agrarias en el impacto del fuego a nivel de paisaje, sirviendo estas parcelas como “barrera” de propagación, reduciendo el área afectada y el tamaño potencial de los incendios. La ventaja de la simulación como herramienta reside en su flexibilidad para recrear escenarios de toma de decisiones, ya que permite una aproximación a escenarios plausibles, de forma que se puede “jugar” con distintas opciones buscando de cara a la optimización de estrategias y recursos, así como analizar eventos pasados para comprenderlos mejor y aprender de ellos (Parisien et al, 2019). Así, se ha podido comprobar, como el abandono agrario ocurrido en la Comarca del Matarraña, de algo más de 40 km², ha provocado incrementos en la probabilidad en el 50% del territorio, unos 460 km². Estos datos, podrían compararse con lo obtenido por Ric e Ibarra (2015) para complementar y

actualizar los mapas creados, comprobando así, si la actividad llevada a cabo por el Banco de Tierras desde hace casi 10 años ha tenido algún avance en la disminución de la probabilidad de quema.

Es evidente que la recuperación de espacios agrícolas no solo conlleva beneficios en el territorio, ya que es una forma de fijar población y rejuvenecer zonas muy envejecidas, sino que, además, repercute favorablemente en el medioambiente. En la actual situación en la que cada año se baten récords de días consecutivos de temperaturas extremas (véase “Copernicus: Summer 2022 Europe’s hottest on record”, 2022) y con una escasez de agua cada vez más notable; hay que tener en cuenta que, los incendios producidos este año (con el gasto asociado que conlleva, tanto por pérdidas como por el trabajo de extinción), pueden volverse la norma en los países mediterráneos. Buscar alternativas y soluciones para proteger el territorio y su población debe ser preferente en las políticas de económicas y cambio climático (Ruffault et al, 2020).

En la línea de lo que plantean Rodrigues et al (2022a), la posibilidad de realizar una cuantificación del valor de las afecciones para priorizar la recuperación de las parcelas, entendiendo el paisaje para detectar los nodos de transmisión de los incendios o las zonas con mayor BP, permite actuar adelantándose al fenómeno y reduciendo sus consecuencias. En este sentido, el enfoque secuencial de este tipo de modelos permite leer el territorio en todo su contexto y comprender de forma holística el efecto que tiene cada parámetro simulado sobre él. Por ejemplo, al hilo del incremento observado en el riesgo de transmisión del fuego a los edificios situados en la comarca (14% en el valor de la mediana de BP) y del menor tamaño de los eventos (11% menores en condiciones pre-abandono), sería factible apoyar la priorización de parcelas a recuperar fundamentada en la propia reducción de la probabilidad de quema, en la reducción del riesgo (una vez establecido el balance de pérdidas o impactos derivados del fuego) o en disponibilidad de recursos (presupuesto disponible, régimen de tenencia de la parcelas, etc) (Alcasena et al, 2018; Salis et al, 2022).

Este trabajo es una aproximación preliminar, siendo necesario completar los resultados incorporando simulaciones de escenarios adicionales explorando diversos valores de duración de la propagación, situaciones sinópticas complementarias, condiciones de humedad de combustible menos extremas, o realizar un estudio climático más exhaustivo para afinar más las características de la zona. En su versión actual se ha considerado únicamente el componente humano en la ignición que, si bien usualmente representa aproximadamente el 95% de la ocurrencia total (San Miguel-Ayanz et al, 2013), en la zona de estudio sería necesario incluir también los incendios naturales por rayo, siendo este un elemento fundamental en los regímenes de incendio de la zona (Amatulli et al, 2007; Jiménez-Ruano, 2017).

En cualquier caso, los resultados obtenidos revelan el alto potencial de mitigación del riesgo de incendio asociado a la recuperación de parcelas abandonadas en la Comarca del Matarraña, demostrando que la prevención es efectiva, y que la adecuada gestión del territorio y el medio que nos rodea forma parte de ella y hay que invertir en políticas que permitan hacerlo.

6. CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Máster se ha abordado la caracterización de la distribución y tipología de combustibles de superficie a partir de cartografía de ocupación del suelo e información complementaria, la caracterización de la topografía y de la estructura del dosel arbóreo mediante información LiDAR para el desarrollo de simulaciones específicamente dirigidas a evaluar el efecto del abandono de las parcelas del programa Banco de Tierras en el potencial de exposición al fuego. La conclusión principal alcanzada es que revertir el abandono produciría un descenso generalizado de la probabilidad de

incendio en toda la Comarca afectando potencialmente hasta el 50% de la superficie de la comarca (si bien con intensidad moderada).

Se ha visto que la situación sinóptica más peligrosa corresponde a la del SO Sin Difluencia, con vientos de componente sureste de altas velocidades (27 km/h), correspondiente a fuertes ráfagas de “Bochorno” llegadas desde el mediterráneo. Aunque los principales focos de incendio detectados son asimilables en todas las situaciones, siendo principalmente tres: dos en la parte central de la comarca y otro en el sur, coincidiendo con grandes áreas de los modelos de combustible GS4 y SH9. Ambos modelos, como se puede ver en la Tabla 1, presentan una tasa de cambio de más del 1,5% entre escenarios, por lo que sería interesante comprobar la relación entre estos y la tasa de abandono en el resto del territorio aragonés u otras regiones que hayan experimentado un fuerte abandono.

La ventaja de utilizar este tipo de modelos de simulación con un enfoque secuencial (enlazando ignición, propagación y exposición/vulnerabilidad) reside en que, una vez realizado el cálculo, el resultado puede enfocarse desde distintos campos de aplicación en función de qué queramos conocer. Es decir, en este caso el objetivo ha sido demostrar que el abandono agrario tiene como consecuencia el aumento de BP, pero se también se ha visto el efecto que tiene en edificios, por lo que podría cuantificarse el daño económico que supone este supuesto, o hacer una previsión sobre el número de personas que se pueden ver damnificadas si se cruzan los datos con el catastro, las carreteras que pueden sufrir daños, el planteamiento de rutas alternativas en caso de que esto pasara... En definitiva, se trata de una buena herramienta para la gestión, no sólo del fenómeno en sí, sino también del territorio.

BIBLIOGRAFÍA:

- AEMET (2022) “Meteorología, A. E. de. (s. f.). El verano más cálido de la serie histórica en una España cada vez más árida. Agencia Estatal de Meteorología” *Gobierno de España*. Recuperado 10 de noviembre de 2022, de https://www.aemet.es/es/noticias/2022/09/rueda_de_prensa_estacional_septiembre_2022
- Alcasena, F. J., Ager, A. A., Salis, M., Day, M. A. & Vega-Garcia, C. (2018). “Optimizing prescribed fire allocation for managing fire risk in central Catalonia.” *Science of The Total Environment*, 621, 872-885. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.297>
- Alcasena, F. J., Ager, A. A., Bailey, J. D., Pineda, N. & Vega-García, C. (2019) “Towards a comprehensive wildfire management strategy for Mediterranean areas: Framework development and implementation in Catalonia, Spain.” *Journal of Environmental Management*, 231, 303-320. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.027>
- Amatulli, G., Peréz-Cabello, F. & de la Riva, J. (2007). “Mapping lightning/human-caused wildfires occurrence under ignition point location uncertainty.” *Ecological Modelling*, 200(3-4), 321-333. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.08.001>
- Andersen, H. E., McGaughey, R. J. & Reutebuch, S. E. (2005) “Estimating Forest canopy fuel parameters using LIDAR data.” *Remote Sensing of Environment*, 94(4), 441-449. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.013>
- Arellano Pérez, S. (2021) “Caracterización del combustible del dosel arbóreo mediante sensores remotos y evaluación del efecto de las claras sobre el comportamiento y severidad potenciales del fuego en pinares del NO de España.” *Escuela de Doctorado Internacional de la Universidad de Santiago de Compostela. Programa de Doctorado en Ingeniería para el Desarrollo Rural y Civil*.
- Banco de Datos de la Naturaleza del Ministerio de Medio Ambiente (2007) “Mapa Forestal de España a escala 1:50.000 (MFE50). (s. f.)” *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Recuperado 5 de noviembre de 2022, de https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/mapa-forestal-espana/mfe_50.aspx
- Botequim, B., Fernandes, P. M., Borges, J. G., González-Ferreiro, E. & Guerra-Hernández, J. (2019) “Improving silvicultural practices for Mediterranean forests through fire behaviour modelling using LiDAR-derived canopy fuel characteristics.” *International Journal of Wildland Fire*, 28(11), 823. <https://doi.org/10.1071/wf19001>
- Busquets, E., Castellnou, M., González-Olabarria, JR., Piqué, M. (2019) “Escenaris meteorològics per la simulació d'incendis forestals.” *Servidor PREVINCAT*.
- Cervera, T., Pino, J., Marull, J., Padro, R., Tello, E. (2019) “Understanding the long-term dynamics of forest transition: From deforestation to afforestation in a Mediterranean landscape (Catalonia, 1868–2005).” *Land use policy* 80, 318–331. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.10.006>
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M. P., Vilar, L., Martínez, J., Martín, S., Ibarra, P., de la Riva, J., Baeza, J., Rodríguez, F., Molina, J. R., Herrera, M. A. & Zamora, R. (2010) “Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies.” *Ecological Modelling*, 221(1), 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017>
- Chuvieco, E., Aguado, I., Jurdao, S., Pettinari, M. L., Yebra, M., Salas, J., Hantson, S., de la Riva, J., Ibarra, P., Rodrigues, M., Echeverría, M., Azqueta, D., Román, M. V., Bastarrika, A., Martínez, S., Recondo, C., Zapico, E. & Martínez-Vega, F. J. (2014) “Integrating geospatial information into

fire risk assessment.” *International Journal of Wildland Fire*, 23(5), 606. <https://doi.org/10.1071/wf12052>

C3S (2022) “Copernicus: Summer 2022 Europe’s hottest on record. (s. f.).” *Copernicus*. Recuperado 9 de noviembre de 2022, de <https://climate.copernicus.eu/copernicus-summer-2022-europes-hottest-record>

Dirección General de Gestión Forestal (2015) “Análisis del régimen de incendios y elaboración de escenarios meteorológicos por zona de meteoalerta de la Comunidad Autónoma de Aragón.” *Gobierno de Aragón. Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad*. https://www.aragon.es/documents/20127/674325/2015_ANALISIS_REGIMEN_INCENDIOS.pdf/8919acc0-c7f5-cda8-07a4-9bafdfbd26bf

Fernández-Alonso, J.M., Alberdi, I., Álvarez-González, J.G. et al. (2013) “Canopy fuel characteristics in relation to crown fire potential in pine stands: analysis, modelling and classification.” *Eur J Forest Res* 132, 363–377 <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0680-z>

Fidalgo-González, L. A., Arellano-Pérez, S., Álvarez-González, J. G., Castedo-Dorado, F., Ruiz-González, A. D. & González-Ferreiro, E. (2019) “Estimación de la distribución vertical de combustibles finos del dosel de copas en masas de *Pinus sylvestris* empleando datos LiDAR de baja densidad.” *Revista de Teledetección*, 53, 1. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.11241>

Finney, M.A. (2002) “Fire growth using minimum travel time methods.” *Can. J. For. Res.* 32 (8), 1420–1424.

Finney, M. A., (2006) “An Overview of FlamMap Fire Modeling Capabilities.” In: Andrews, Patricia L.; Butler, Bret W., comps. 2006. *Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings. 28-30 March 2006; Portland, OR. Proceedings RMRS-P-41*. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. 213-220, 041. https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p041/rmrs_p041_213_220.pdf

Fontanet Latorre, D. (2020) “Migración juvenil y despoblación. Estudio de caso en la Comarca del Matarraña.” *Repositorio Institucional de Documentos*. <https://zaguan.unizar.es/record/101922/files/TAZ-TFG-2020-1571.pdf>

Grupo de Trabajo de Prevención (2022) “Orientaciones estratégicas para la gestión de incendios forestales en España.” *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*, Madrid. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/planes-y-estrategias/orientacionesestrategicasiff_cs28072022_tcm30-543585.pdf

Holden, Z.A., Morgan, P., Evans, J.S. (2009) “A predictive model of burn severity based on 20-year satellite-inferred burn severity data in a large southwestern US wilderness area.” *Forest Ecology and Management*, 258, 2399-2406. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.08.017>

Jahdi, R., Del Giudice, L., Melis, M., Lovreglio, R., Salis, M., Arca, B. & Duce, P. (2022). “Assessing the effects of alternative fuel treatments to reduce wildfire exposure.” *Journal of Forestry Research*. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01504-2>

Jiménez-Ruano, A., Rodrigues Mimbrero, M. & de la Riva Fernández, J. (2017). “Exploring spatial-temporal dynamics of fire regime features in mainland Spain.” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(10), 1697-1711. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1697-2017>

Jolly, W., Cochrane, M., Freeborn, P. et al. (2015) “Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013.” *Nat Commun* 6, 7537. <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>

- Jones, M. W., Abatzoglou, J. T., Veraverbeke, S., Andela, N., Lasslop, G., Forkel, M., Smith, A. J. P., Burton, C., Betts, R. A., van der Werf, G. R., Sitch, S., Canadell, J. G., Santín, C., Kolden, C., Doerr, S. H. & Le Quéré, C. (2022) "Global and Regional Trends and Drivers of Fire Under Climate Change." *Reviews of Geophysics*, 60(3). <https://doi.org/10.1029/2020rg000726>
- Keane, R.E., Burgan, R.E., Wagtendonk, J.V. (2001) "Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling." *International Journal of Wildland Fire*, 10, 301-319. <https://doi.org/10.1071/WF01028>
- Miezite, L. E., Ameztegui, A., De Cáceres, M., Coll, L., Morán-Ordóñez, A., Vega-García, C. & Rodrigues, M. (2022) "Trajectories of wildfire behavior under climate change. Can forest management mitigate the increasing hazard?" *Journal of Environmental Management*, 322, 116134. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116134>
- Morán-Ordóñez, A., Ameztegui, A., De Cáceres, M., de-Miguel, S., Lefèvre, F., Brotons, L. & Coll, L. (2020) "Future trade-offs and synergies among ecosystem services in Mediterranean forests under global change scenarios." *Ecosystem Services*, 45, 101174. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101174>
- Moreira, F., Ascoli, D., Safford, H., Adams, M. A., Moreno, J. M., Pereira, J. M. C., Catry, F. X., Armesto, J., Bond, W., González, M. E., Curt, T., Koutsias, N., McCaw, L., Price, O., Pausas, J. G., Rigolot, E., Stephens, S., Tavsanoglu, C., Vallejo, V. R., Fernandes, P. M. (2020) "Wildfire management in Mediterranean-type regions: paradigm change needed." *Environmental Research Letters*, 15(1), 011001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab541e>
- Moreno, J. M., R. Urbeta, I., Bedia, J., Gutiérrez, J.M., Vallejo, V.R. (2015) "Capítulo 34. Los incendios forestales en España ante al cambio climático. Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático: impactos, vulnerabilidad y adaptación en España: informe de evaluación." *Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*.
- Nelson, R.M., (2000) "Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content2. *Can. J. For. Res.* 30, 1071–1087.
- Pais, S., Aquilué, N., Campos, J., Sil, N., Marcos, B., Martínez-Freiría, F., Domínguez, J., Brotons, L., Honrado, J. P. & Regos, A. (2020) "Mountain farmland protection and fire-smart management jointly reduce fire hazard and enhance biodiversity and carbon sequestration." *Ecosystem Services*, 44, 101143. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101143>
- Parisien, M. A., Dawe, D. A., Miller, C., Stockdale, C. A. & Armitage, O. B. (2019) "Applications of simulation-based burn probability modelling: a review." *International Journal of Wildland Fire*, 28(12), 913. <https://doi.org/10.1071/wf19069>
- Parker, G. G. & Russ, M. E. (2004) "The canopy surface and stand development: assessing forest canopy structure and complexity with near-surface altimetry." *Forest Ecology and Management*, 189(1-3), 307-315. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.09.001>
- Ric Sorinas, O. y Ibarra Benlloch, P. (2015) "La cartografía de cultivos abandonados y de selección de áreas prioritarias de recuperación como instrumento eficaz del proyecto Banco de tierras de la Comarca del Matarraña". *XXIV Congreso de la Asociación de Geógrafos Españoles 28-30 de septiembre, 2015, Zaragoza*.
- Rodrigues, Marcos. (2018) "Introduction to spatial statistics with R." *Zenodo*.

- Rodrigues, M., Alcasena, F., Gelabert, P. & Vega-García, C. (2020) “Geospatial Modeling of Containment Probability for Escaped Wildfires in a Mediterranean Region.” *Risk Analysis*, 40(9), 1762-1779. <https://doi.org/10.1111/risa.13524>
- Rodrigues, M., Zúñiga-Antón, M., Alcasena, F., Gelabert, P. & Vega-García, C. (2022a). “Integrating geospatial wildfire models to delineate landscape management zones and inform decision-making in Mediterranean areas.” *Safety Science*, 147, 105616. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105616>
- Rodrigues, M., Cunill Camprubí, N., Balaguer-Romano, R., Ruffault, J., Fernandes, P. M. & de Dios, V. R. (2022b) “Drivers and implications of the extreme 2022 wildfire season in Southwest Europe.” *BioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2022.09.29.510113>
- Romero Cabezudo, S. (2021) “Análisis de la estructura de la cubierta vegetal en los campos abandonados de la Comarca del Matarraña mediante teledetección activa (LiDAR) y pasiva (Landsat).” *Repositorio Institucional de Documentos*. <https://zaguan.unizar.es/record/109153?ln=es>
- Ruffault, J., Curt, T., Moron, V., Trigo, R. M., Mouillot, F., Koutsias, N., Pimont, F., Martin-StPaul, N., Barbero, R., Dupuy, J. L., Russo, A. & Belhadj-Khedher, C. (2020). “Increased likelihood of heat-induced large wildfires in the Mediterranean Basin.” *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70069-z>
- Salis, M., Del Giudice, L. D., Jahdi, R., Alcasena-Urdiroz, F., Scarpa, C., Pellizzaro, G., Bacci, V., Schirru, M., Ventura, A., Casula, M., Pedes, F., Canu, A., Duce, P. & Arca, B. (2022). “Spatial Patterns and Intensity of Land Abandonment Drive Wildfire Hazard and Likelihood in Mediterranean Agropastoral Areas.” *Land*, 11(11), 1942. <https://doi.org/10.3390/land11111942>
- San-Miguel-Ayanz, J., Moreno, J. M. & Camia, A. (2013). “Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: Lessons learned and perspectives.” *Forest Ecology and Management*, 294, 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.050>
- Sanz, M.J. y Galán, E. (editoras), (2020) “Impactos y riesgos derivados del cambio climático en España. Oficina Española de Cambio Climático.” *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid*.
- Scott, J. E. & Burgan, R. E. (2005) “Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel’s Surface Fire Spread Model.” *Createspace Independent Publishing Platform*.
- White, J.C., Wulder, M.A., Varhola, A., Vastaranta, M., Coops, N.C., Cook, B.D., Pitt, D., Woods, M. (2013) “A best practice guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an areabased approach (Version 2.0).” *Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Canadian Wood Fibre Centre*. <https://doi.org/10.5558/tfc2013-132>
- Wunder, S., Calkin, D. E., Charlton, V., Feder, S., Martínez de Arano, I., Moore, P., Rodríguez y Silva, F., Tacconi, L. & Vega-García, C. (2021) “Resilient landscapes to prevent catastrophic forest fires: Socioeconomic insights towards a new paradigm.” *Forest Policy and Economics*, 128, 102458. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102458>

Anejo 1

Obtención de la topografía y de los parámetros estructurales de la vegetación

Marcos Rodrigues e Isabel Gómez

Noviembre de 2022

1. CÁLCULO DE CARACTERÍSTICAS RELACIONADAS CON LOS BOSQUES DE LIDAR-ALS

1.1. Instalar y cargar las librerías necesarias

El flujo de trabajo depende de una serie de paquetes que debemos descargar previamente mediante `install.packages("package")`. La piedra angular del procedimiento se encuentra en el paquete lidR, que contiene las funciones necesarias para manipular y procesar archivos tipo LiDAR. Haremos uso de varias bibliotecas auxiliares para realizar algunos cálculos específicos (`moments`) y procesar datos espaciales vectoriales y ráster (`sp`, `raster`, `rgdal`)

```
#Instalar los paquetes necesarios
install.packages("lidR")
install.packages("raster")
install.packages("moments")
install.packages("sp")
install.packages("rgdal")
install.packages("sf")

#Cargarlos
library(lidR)
library(moments)
library(raster)
library(sp)
library(rgdal)
library(sf)
```

1.2. Definición de directorio de trabajo y parámetros de cálculo para la vegetación

Para facilitar el cálculo si posteriormente se quieren cambiar parámetro, se realiza la definición de todos los parámetros de cálculo

```
# configuración del directorio de trabajo
dir_trabajo <- "C:/Master/07TFM/LiDAR"
# cambiar ruta a la que yo quiera y "\ de la ruta por "/"
setwd(dir_trabajo)
#configuración del set de trabajo según la variable dir_trabajo. EJECUTAR

# bucle que recorre Lista, comprobar sistema de referencia y reproyectar si es necesario
##### variables
resol = 20
maximo = 35
minimo = 0
q95 = 0.95
q20 = 0.20
maxCBD = 8
minCBD = 2
maxcurt = 3.80
mincurt = 0
maxK_CBH = 14
```

```
minK_CBH = 6.70
MaxMDT= 0.1
MinMDT = 0
```

1.3. Automatización y procesamiento de múltiples mosaicos láser

Para poder leer y procesar todos los raster necesarios, será necesario hacer dos pasadas distintas cambiando el Huso al que pertenecen (Huso 30 o 31)

Por motivos prácticos, aquí solo se mostrará un proceso, señalándose aquellos puntos en los que sería necesario cambiar algún parámetro por cambio de Huso

1.3.1. Cálculo de los parámetros de vegetación

```
## Lista de archivos Laz (Las)
listaLAS <- list.files("COL/Huso31/",
                       pattern = ".laz$",
                       full.names = T)
#es más práctico tener por carpetas de Huso para poder cambiar rápido de directorio y leer la información de una sola vez

## lista de nombres sin ruta
names <- list.files("COL/Huso31/",
                      pattern = ".laz$",
                      full.names = F)
#igual que en la lista anterior, aquí también habrá que cambiar de carpeta según el uso que se trabaje

## nombres de Los archivos
names <- substr(names,1,nchar(names)-4)

## carpeta de salida (crearla antes de ejecutar el código)
out.dir <- "results/"

## Looping de Los archivos Lasz
for (i in 1:length(listaLAS)) {
  #lectura cada laz
  las <- readLAS(listaLAS[i])

  # filtrado de la vegetación y el terreno
  las <- filter_poi(las, Classification %in% c(2,3,4,5,8))

  # normalización de La nube de puntos
  lasn <- normalize_height(las, knnidw(k = 8, p = 2))

  # Limpieza de outliers
  las_filt <- filter_poi(lasn, lasn@data$Z>=minimo & lasn@data$Z<=maximo)
  las_filt_CBD <- filter_poi(lasn, lasn@data$Z>=minCBD & lasn@data$Z<=maxCBD)
  las_filt_curt <- filter_poi(lasn, lasn@data$Z>=mincurt & lasn@data$Z<=maxcurt)
```

```

las_filt_K_CBH <- filter_poi(lasn, lasn@data$Z>=minK_CBH & lasn@data$Z<=max
K_CBH)

#se ha hecho una Lista para cada uno de los parámetros distintos fijados arriba

#####
##### CALCULO DE MÉTRICAS #####
#####

#Canopy Relief Ratio (CRR)
f_CRR <- function(x) {CRR=(mean(x)-min(x))/(max(x)-min(x))}
r_CRR <- grid_metrics(las_filt, f_CRR(Z))
writeRaster(r_CRR,paste0(out.dir,names[i],"_CRR.tif"))

# Fracción de cobertura del dosel (CCF)
filt_FCC1 <- filter_poi (las_filt, las_filt@data$ReturnNumber==1 & las_filt
@data$Z>4)
filt_FCC2 <- filter_poi (las_filt, las_filt@data$ReturnNumber==1 )

f_FCC <- function(x) {FCC1=(length(x))}
r_FCC1 <- grid_metrics(filt_FCC1,f_FCC(Z),res= resol)
##grid_metric pasa de retornos a px

r_FCC2 <- grid_metrics(filt_FCC2,f_FCC(Z),res= resol)

## CCCF
r_FCC <- (r_FCC1/r_FCC2)*100
writeRaster(r_FCC,paste0(out.dir,names[i],"_FCC.tif"))

# Se sacan los pixeles menores de 4 metros
# Fracción de cobertura del dosel
filt_F2_41 <- filter_poi (las_filt, las_filt@data$ReturnNumber==1 & las_filt
@data$Z<=4) ##
filt_F2_42 <- filter_poi (las_filt, las_filt@data$ReturnNumber==1 )

f_F2_4 <- function(x) {F2_41=(length(x))}
r_F2_41 <- grid_metrics(filt_F2_41,f_F2_4(Z),res= resol)
##grid_metric pasa de retornos a px

r_F2_42 <- grid_metrics(filt_F2_42,f_F2_4(Z),res= resol)

## CCCF
r_F2_4 <- (r_F2_41/r_F2_42)*100
writeRaster(r_F2_4,paste0(out.dir,names[i],"_F2_4.tif"))

## CCCF

```

```

r_F2 <- (r_F2_1/r_F2_2)*100
writeRaster(r_F2,paste0(out.dir,names[i],"_F2.tif"))

# Altura de vegetacion
f_p95 = function(x) {p95 = quantile(x, q95)}

r_p95 <- grid_metrics(las_filt, f_p95(Z), res = resol) # res da la resolucion de px
plot(r_p95, main="95th height percentile")

r_p95 <- grid_metrics(las_filt, f_p95(Z), res = resol) # res da la resolucion de px
writeRaster(r_p95,paste0(out.dir,names[i],"_P95.tif"))

#CBD

# P95 --> calculado previamente

# kurtosis 2-8
f_curt <- function(x) {kurt= kurtosis(x)}
r_curt <- grid_metrics(las_filt_CBD, f_curt(Z))
writeRaster(r_curt,paste0(out.dir,names[i],"_curt_2_8.tif"))

#PFRAM --> Modificación del FCC a 3m por ser el umbral del matorral boscoso de transición
# Fracción de cobertura del dosel (CCF)
filt_PFRAM1 <- filter_poi (las_filt, las_filt@data$ReturnNumber==1 & las_filt@data$Z>3)
filt_PFRAM2 <- filter_poi (las_filt, las_filt@data$ReturnNumber==1 )

f_PFRAM <- function(x) {PFRAM1=(length(x))}
r_PFRAM1 <- grid_metrics(filt_PFRAM1,f_PFRAM(Z),res= resol)
##grid_metric pasa de retornos a px

r_PFRAM2 <- grid_metrics(filt_PFRAM2,f_PFRAM(Z),res= resol)

## PFRAM
r_PFRAM <- (r_PFRAM1/r_PFRAM2)*100
writeRaster(r_PFRAM,paste0(out.dir,names[i],"_PFRAM_03.tif"))

#CBH

## P20
f_p20 = function(x) {p20 = quantile(x, q20)}
#
r_p20 <- grid_metrics(las_filt, f_p20(Z), res = resol) # res da la resolucion de px

```

```

plot(r_p20, main="20th height percentile")
#
r_p20 <- grid_metrics(las_filt, f_p20(Z), res = resol) # res da la resolución de px
writeRaster(r_p20,paste0(out.dir,names[i],"_P20.tif"))
#
## kurtosis 0-3.8
f_curt <- function(x) {kurt=kurtosis(x)}
r_curt <- grid_metrics(las_filt_curt, f_curt(Z))
writeRaster(r_curt,paste0(out.dir,names[i],"_curt0_38.tif"))

## kurtosis 6.7-14
f_curt <- function(x) {kurt=kurtosis(x)}
r_curt <- grid_metrics(las_filt_K_CBH, f_curt(Z))
writeRaster(r_curt,paste0(out.dir,names[i],"_curt6_14.tif"))

print(paste0(i,"/",length(listaLAS)))

}

```

1.3.2. Cálculo de los parámetros físicos

```

for (i in 1:length(listaLAS)) {
  #lee los Laz
  las <- readLAS(listaLAS[i])

  # filtra el terreno
  las <- filter_poi(las, Classification %in% c(2,8))

  #crea el MDT
  f_MDT <- function(x) {f_las=(mean(x))}
  r_MDT <- grid_metrics(las,f_MDT(Z),res= resol)

  writeRaster(r_MDT, paste0(out.dir,names[i],"_mdt.tif"))

  #calcula la pendiente
  f_slope = terrain(r_MDT, 'slope', unit='degrees', neighbors=8)
  # r_slope <- terra::slope(r_MDT)#grid_metrics(las,f_slope(Z),res= resol)
  writeRaster(f_slope, paste0(out.dir,names[i],"_slope.tif"))

  #calcula la orientación
  f_aspect = terrain(r_MDT, 'aspect', unit='degrees', neighbors=8)
  # r_aspect <- grid_metrics(las,f_aspect(Z),res= resol)
  writeRaster(f_aspect, paste0(out.dir,names[i],"_aspetc.tif"))
}

```

1.4. Creación del mosaico

Hasta ahora, se ha trabajado con archivos individuales, en este momento, se crea un mosaico de ellos para tener toda la zona de estudio en el mismo archivo. Como se ha comentado ya, esto se hará dos veces, una para el Huso 30 y otra para el Huso 31.

```
# List with the metrics to merge. This must match the sufix we used in the previous step.
met <- c( "CRR", "FCC", "F2_4", "P95", "curt_2_8", "PFRAM_03", "P20", "curt0_38", "curt6_14", "mdt", "slope", "aspect")

# Cargando y uniendo
for (z in 1:length(met)) {
  files_raster<- list.files(path = out.dir,
                             pattern =paste0(met[z],".tif$"),
                             full.names = TRUE)

  metList <- list()
  for (y in 1:length(files_raster)) {
    metList[[y]] <- raster(files_raster[y])
  }

  # Cargar y mosaicar Los rásters
  metRas.1 <- metList[[1]]
  metRas.2 <- metList[[2]]
  met.mos<- mosaic(metRas.1,metRas.2,fun=mean)

  for (y in 3:length(metList)){
    met.iter <- metList[[y]]
    met.mos <- mosaic(met.iter,met.mos,fun=mean)
  }

  met.mos[!is.finite(met.mos)] <- NA
  plot(met.mos,main= met[z])

  raster:::plot(met.mos,main=paste0(met[z], " - Clip"))
  #asignar proyección
  crs(met.mos) <- "+proj=utm +zone=31 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs"
  writeRaster(met.mos,paste0(out.dir,"mosaic/", met[z],"Huso31.tif"),overwrite=T)
  # en este punto se cambiará el uso, de ser necesario

}
```

1.5. Recorte de máscara

Se creará una máscara a partir de un archivo .shp para recortar los archivos creados. En este caso, se ha reproyectado con un batch los archivos del Huso 31 al Huso 30 y se han unido antes de hacer este paso, si solo se tienen archivos en un Huso, esto no es necesario

```
# aquí se hace la máscara con el buffer de la zona a trabajar

msk <- st_read ("C:/Master/07TFM/Limite/Mata_Buffer_10.shp")

## Convertimos la máscara a un objeto Spatial
msk_sp <- as(msk, "Spatial")

lista <- list.files("C:/Master/07TFM/LiDAR/results/mosaic/",
                     pattern = ".tif$",
                     full.names = T)

for(i in 1:length(lista)){

  met <- tools::file_path_sans_ext(basename(lista[[i]]))
  #entra a la lista, coge la ruta y el basename deja solo el nombre del fichero
  capa <- raster::raster(lista[[i]])
  corte <- crop(capa, msk_sp) #recorta al extent
  recorte <- mask(corte, msk_sp) #recorta al polígono

  writeRaster(recorte,paste0(out.dir,"CapasFinales/", met, ".tif"),overwrite=T)

}
```

2. LAYERSTACK

Por necesidades del software a utilizar a continuación, se necesita que todos los archivos tengan la misma extensión, por lo que se hará un layerstack para confirmarlo (este paso es solo de comprobación, si no lo están, habrá que ir al GIS para arreglarlo) Este último paso se hace con los archivos ya recalculados con paso de malla de 100 m.

```
files <- list.files("C:/Master/07TFM/LiDAR/results/CapasFinales/100/",
                     pattern = ".tif$",
                     full.names = T)
raster_stack <- stack(files)
```

Anejo 2

Cálculos estadísticos aplicados a los resultados de las simulaciones

Marcos Rodrigues e Isabel Gómez

Noviembre de 2022

1. INSTALAR Y CARGAR LAS LIBRERÍAS NECESARIAS

El flujo de trabajo depende de una serie de paquetes que debemos descargar previamente mediante `install.packages("package")`.

```
#Instalar los paquetes necesarios
install.packages("udunits2")
install.packages("tidyverse")
install.packages("terra")
install.packages("sf")

#Cargarlos
library(udunits2)
library(sf)
library(tidyverse)
library(terra)
```

2. CARGA Y LECTURA DE ARCHIVOS

```
bp_aband <- rast('E:/TFM_Isabel/Simulaciones/BP_Aband.tif')
crs(bp_aband) <- "epsg:25830"
bp_no_aband <- rast('E:/TFM_Isabel/Simulaciones/BP_No_Aband.tif')
crs(bp_no_aband) <- "epsg:25830"

edif <- read_sf('E:/TFM_Isabel/Edif_TERU.shp')
comarca <- read_sf('E:/TFM_Isabel/Matarrana.shp')
```

3. CÁLCULOS DE INCREMENTOS

```
bp_aband_edif <- bp_aband %>%
  terra::crop(st_buffer(edif, 10))

bp_no_aband_edif <- bp_no_aband %>%
  terra::crop(st_buffer(edif, 10))

#% incremento en BP medio en edificios
(mean(values(bp_aband_edif)) - mean(values(bp_no_aband_edif))) / mean(values(
  bp_no_aband_edif)) * 100
(median(values(bp_aband_edif)) - median(values(bp_no_aband_edif))) / median(v
  alues(bp_no_aband_edif)) * 100

#% incremento en BP medio
```

```

(mean(values(bp_aband)) - mean(values(bp_no_aband))) / mean(values(bp_no_aband)) * 100
(median(values(bp_aband)) - median(values(bp_no_aband))) / median(values(bp_no_aband)) * 100

bp_diff <- bp_aband - bp_no_aband

bp_diff[bp_diff>0] <- 1
bp_diff[bp_diff<=0] <- -1

bp_diff <- crop(bp_diff,comarca)

##%zona
table(as.data.frame(bp_diff))[2]*99*99*0.000001/933.12 * 100

#####
## Zona SMSR
perim_no_aband_SMSR <- read_sf('E:/TFM_Isabel/perímetros/Peri_SMSR_Aband.shp',
, crs= "epsg:25830")
perim_aband_SMSR <- read_sf('E:/TFM_Isabel/perímetros/Peri_SMSR_SW.shp', crs=
"epsg:25830")

summary(st_area(perim_no_aband_SMSR)) * 0.000001
summary(st_area(perim_aband_SMSR)) * 0.000001

## incremento en tamaño medio de incendio
((mean(st_area(perim_aband_SMSR)) * 0.000001) - (mean(st_area(perim_no_aband_
SMSR)) * 0.000001)) / (mean(st_area(perim_no_aband_SMSR)) * 0.000001) * 100

((median(st_area(perim_aband_SMSR)) * 0.000001) - (median(st_area(perim_no_aband_
SMSR)) * 0.000001)) / (median(st_area(perim_no_aband_SMSR)) * 0.000001) * 100

## Zona BCT
perim_no_aband_BCT <- read_sf('E:/TFM_Isabel/perímetros/Peri_BCT_Aband.shp',
, crs= "epsg:25830")
perim_aband_BCT <- read_sf('E:/TFM_Isabel/perímetros/Peri_BCT_SW.shp', crs= "
epsg:25830")

summary(st_area(perim_no_aband_BCT)) * 0.000001
summary(st_area(perim_aband_BCT)) * 0.000001

## incremento en tamaño medio de incendio
((mean(st_area(perim_aband_BCT)) * 0.000001) - (mean(st_area(perim_no_aband_B
CT)) * 0.000001)) / (mean(st_area(perim_no_aband_BCT)) * 0.000001) * 100

((median(st_area(perim_aband_BCT)) * 0.000001) - (median(st_area(perim_no_aban
d_BCT)) * 0.000001)) / (median(st_area(perim_no_aband_BCT)) * 0.000001) * 100

```

```

0

## Zona BEF
perim_no_aband_BEF <- read_sf('E:/TFM_Isabel/perímetros/Peri_BEFAband.shp', crs= "epsg:25830")
perim_aband_BEF <- read_sf('E:/TFM_Isabel/perímetros/Peri_BEF_W.shp', crs= "epsg:25830")

summary(st_area(perim_no_aband_BEF)) * 0.000001
summary(st_area(perim_aband_BEF)) * 0.000001

## incremento en tamaño medio de incendio
((mean(st_area(perim_aband_BEF)) * 0.000001) - (mean(st_area(perim_no_aband_BEF)) * 0.000001)) / (mean(st_area(perim_no_aband_BEF)) * 0.000001) * 100

((median(st_area(perim_aband_BEF)) * 0.000001) - (median(st_area(perim_no_aband_BEF)) * 0.000001)) / (median(st_area(perim_no_aband_BEF)) * 0.000001) * 100

## Total zona de estudio
perim_no_aband_ZE <- read_sf('E:/TFM_Isabel/perímetros/Peri_ZE.shp', crs= "epsg:25830")
perim_aband_ZE <- read_sf('E:/TFM_Isabel/perímetros/Peri_ZE.shp', crs= "epsg:25830")

summary(st_area(perim_no_aband_ZE)) * 0.000001
summary(st_area(perim_aband_ZE)) * 0.000001

## incremento en tamaño medio de incendio
((mean(st_area(perim_aband_ZE)) * 0.000001) - (mean(st_area(perim_no_aband_ZE)) * 0.000001)) / (mean(st_area(perim_no_aband_ZE)) * 0.000001) * 100

((median(st_area(perim_aband_ZE)) * 0.000001) - (median(st_area(perim_no_aband_ZE)) * 0.000001)) / (median(st_area(perim_no_aband_ZE)) * 0.000001) * 100

```

Anejo 3

Planos

Isabel Gómez

Noviembre de 2022

Plano 1: Situación de la zona de estudio.

Plano 2: Límite de la zona de estudio.

Plano 3: Clasificación de modelos de combustible.

Plano 4: Parcelas de cultivo abandonadas cartografiadas en la Comarca del Matarraña.

Plano 5: Clasificación de formaciones arbóreas.

Plano 6: Distribución del CBH en la zona de estudio.

Plano 7: Distribución del CBD en la zona de estudio.

Plano 8: Resumen de los resultados de la simulación de situaciones sinópticas

Plano 9: Cálculo del escenario actual (EA) a partir de los pesos otorgados.

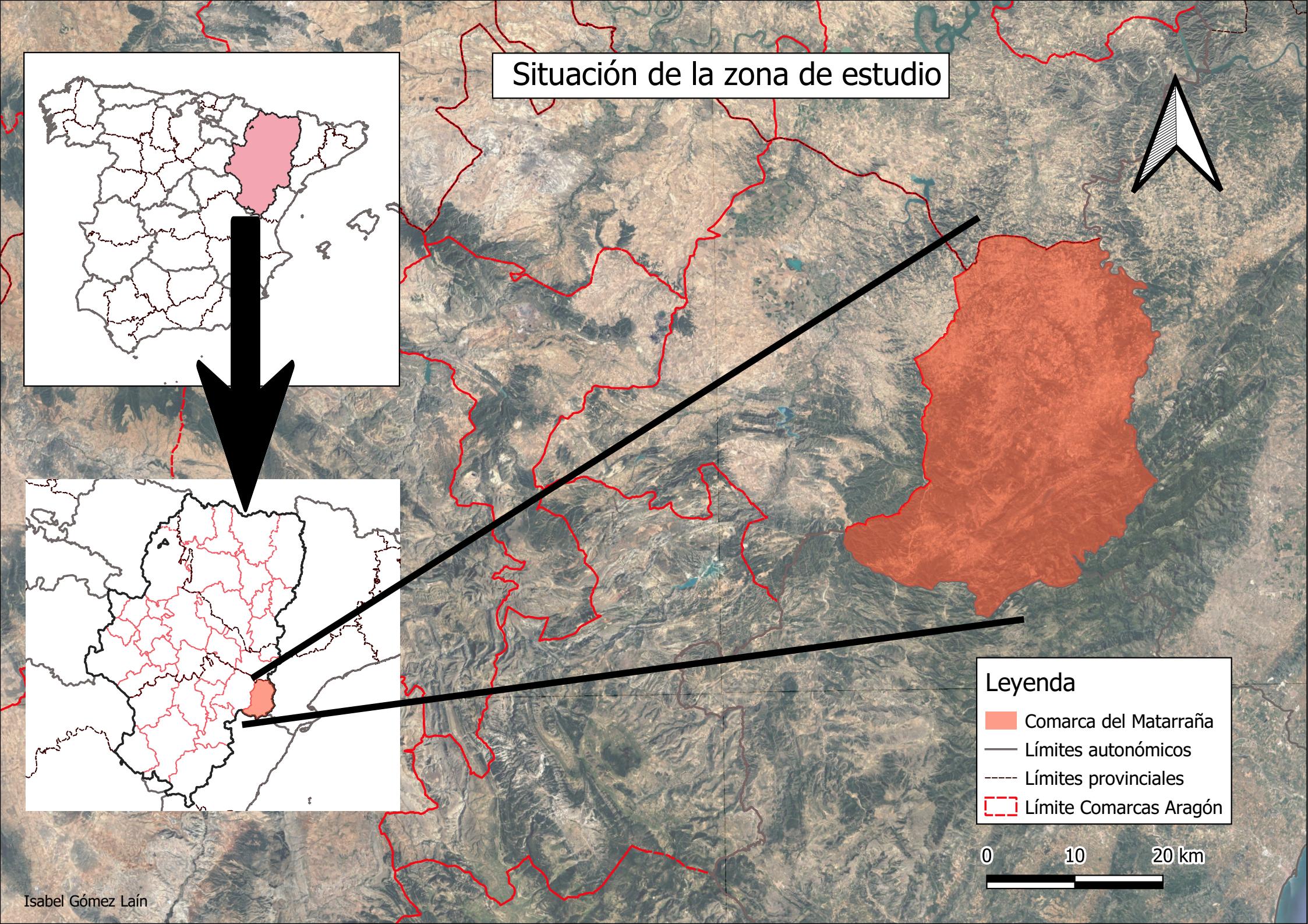
Plano 10: Cálculo del escenario sin abandono agrario (ESAA) a partir de los pesos otorgados.

Plano 11: Probabilidad de quema en el escenario actual (EA)

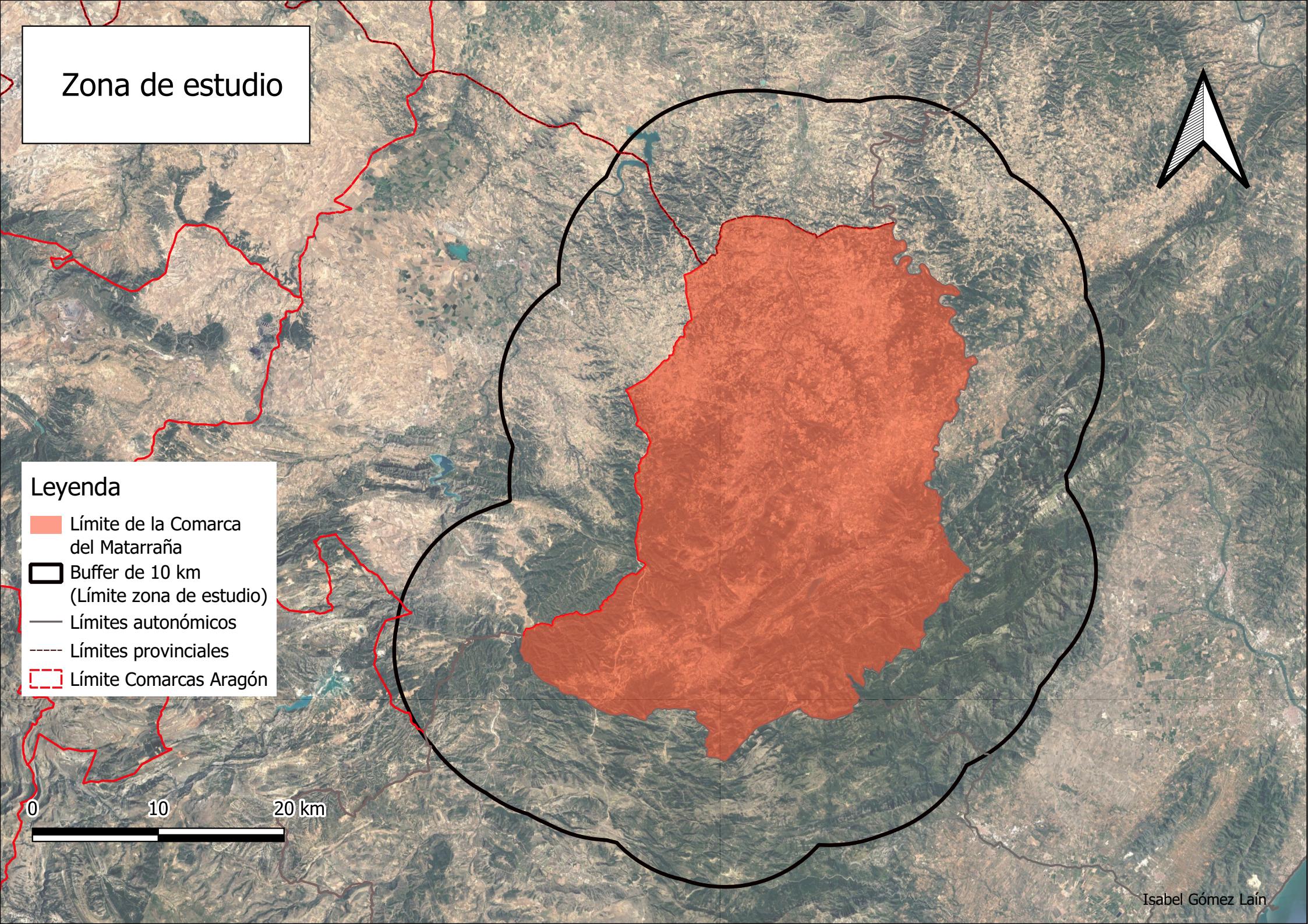
Plano 12: Probabilidad de quema en el escenario sin abandono agrario (ESAA)

Plano 13: Variación de la probabilidad de incendio entre escenarios.

Situación de la zona de estudio

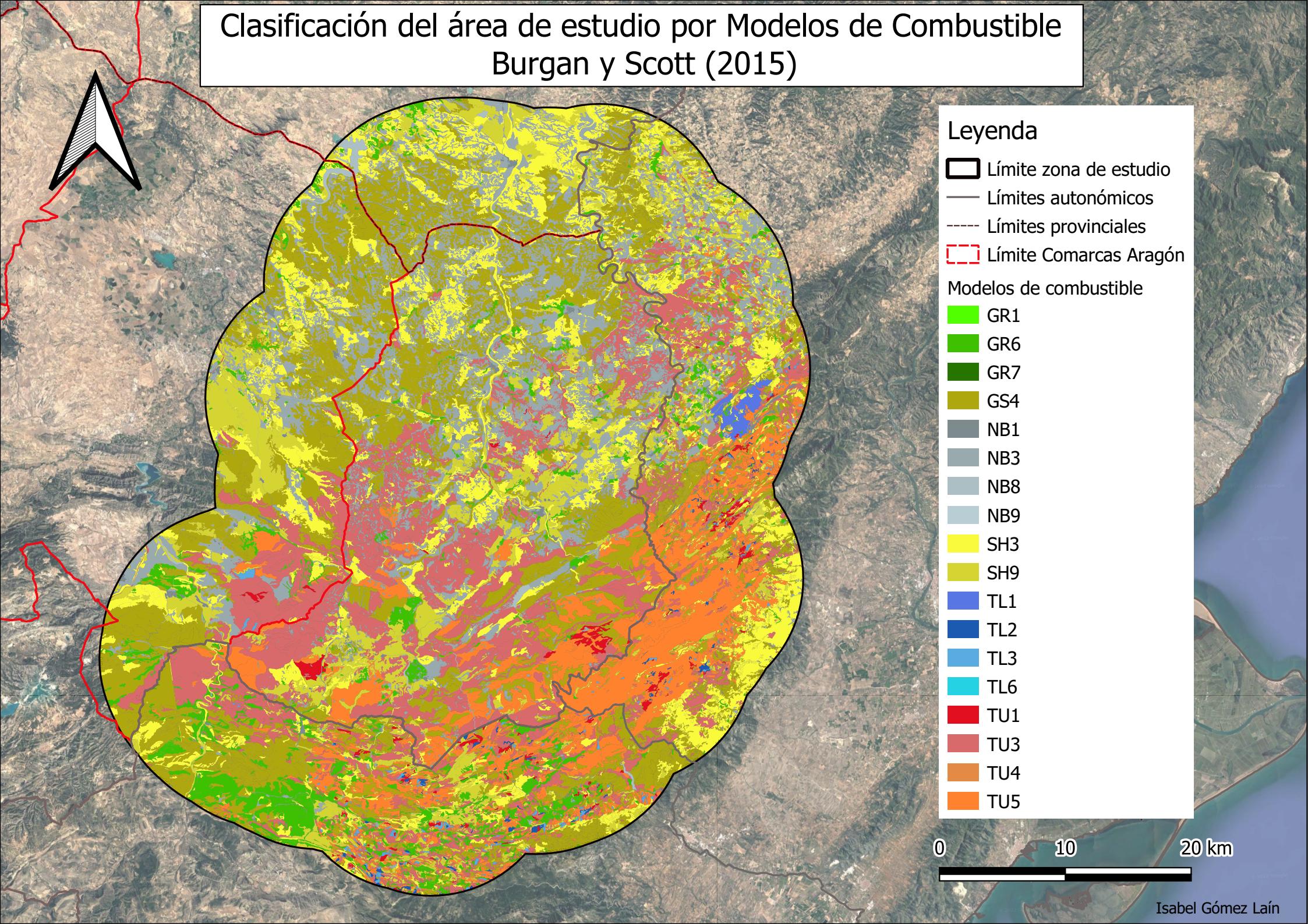


Zona de estudio

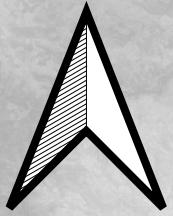


Clasificación del área de estudio por Modelos de Combustible

Burgan y Scott (2015)



Cartografía de parcelas abandonadas



Leyenda

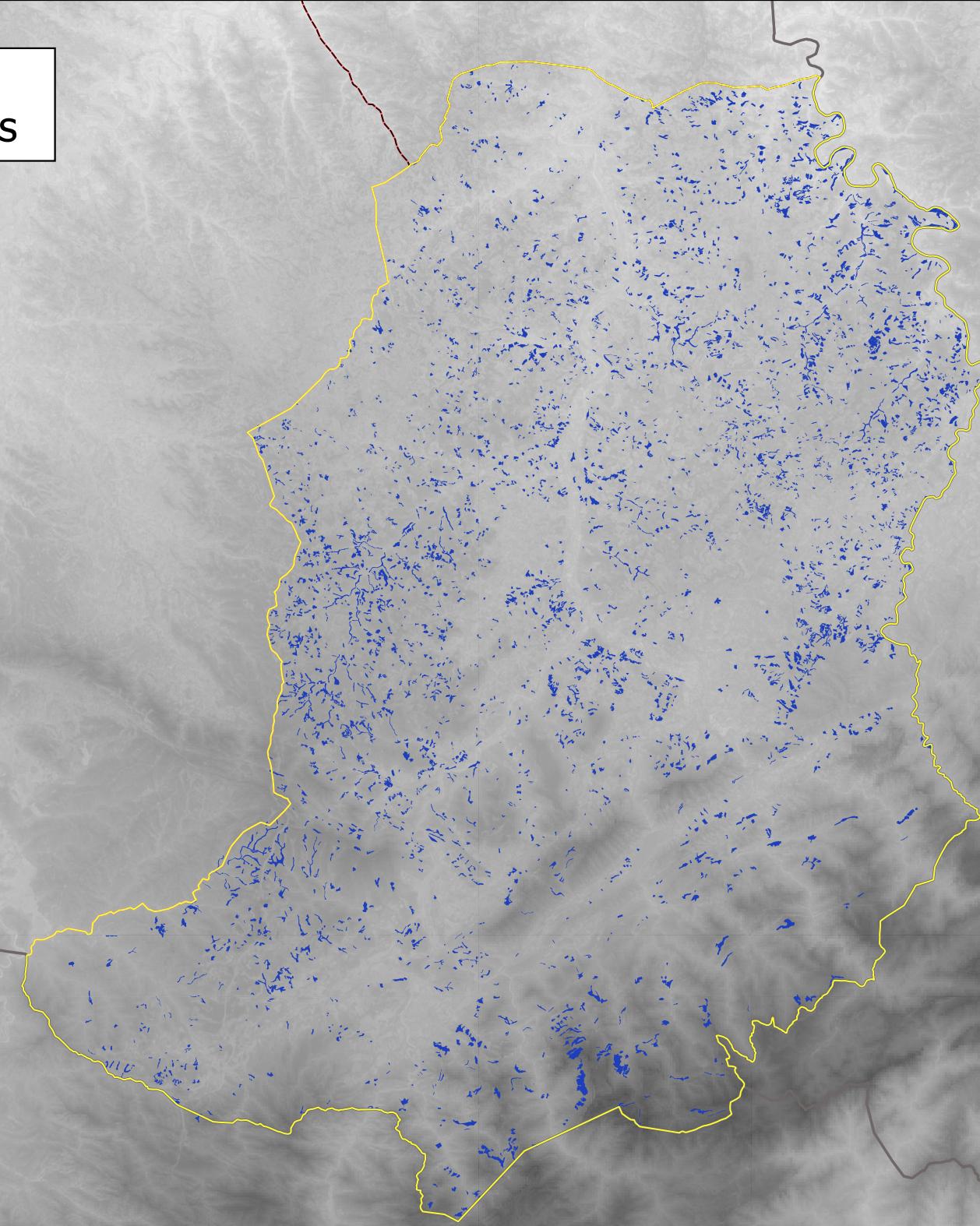
- Límite de la Comarca del Matarraña
- Parcelas abandonadas de la Comarca del Matarraña
- Límites autonómicos
- Límites provinciales
- Límites Comarcas Aragón

MDT

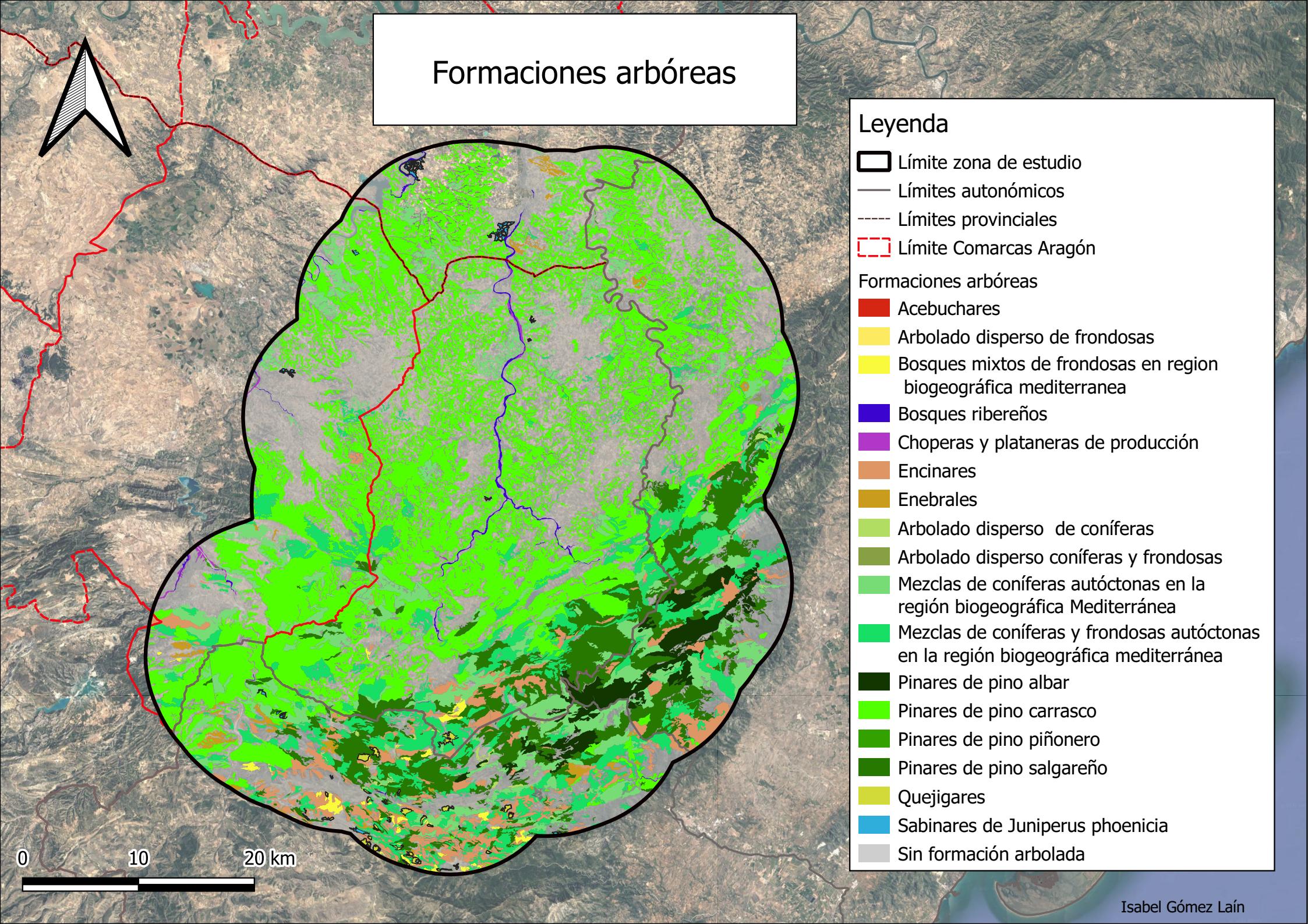
1,434

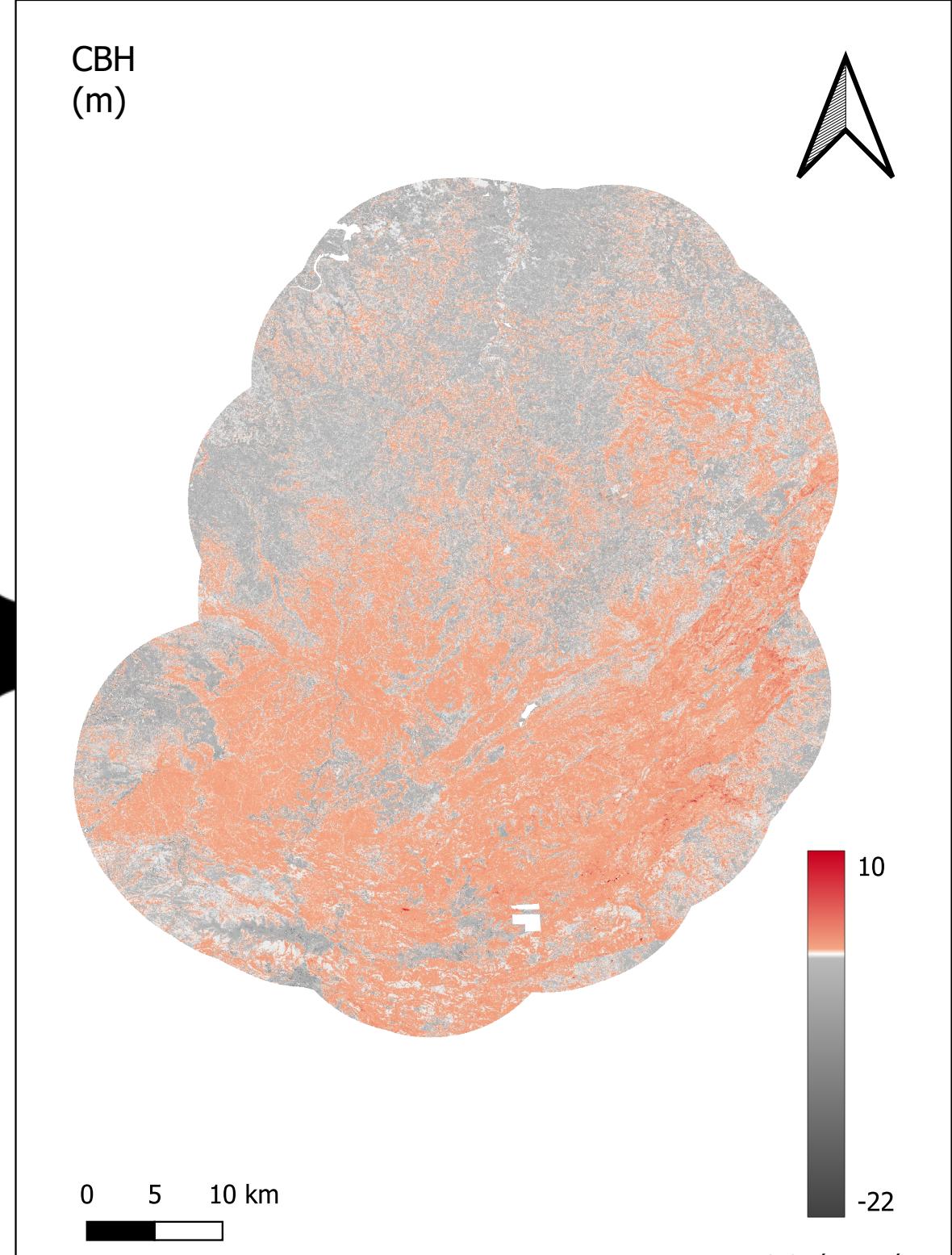
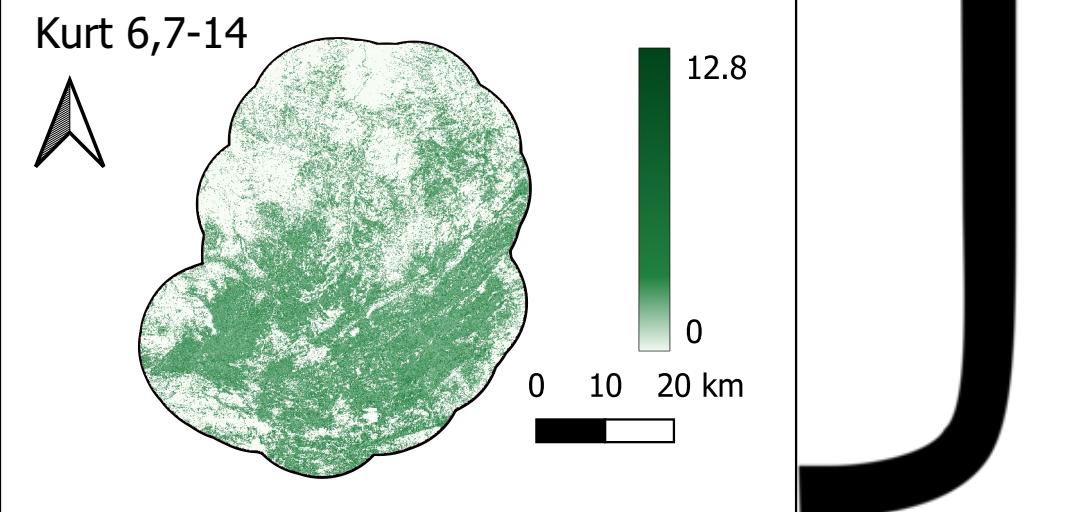
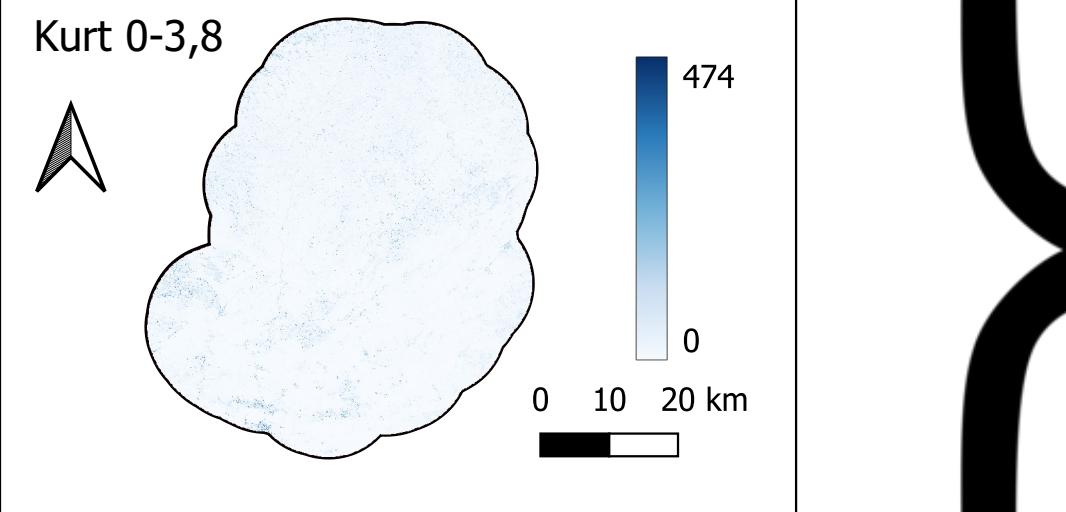
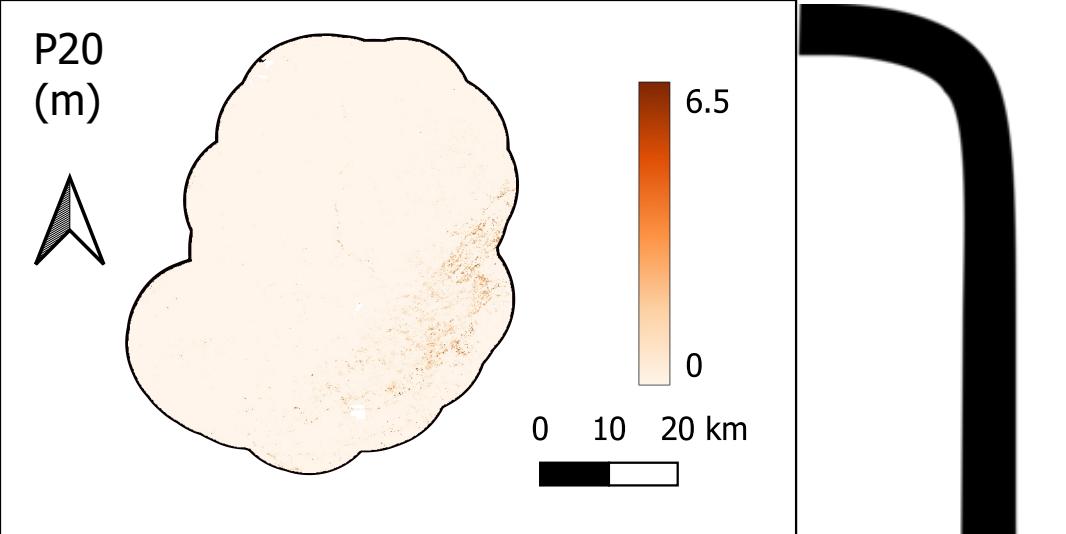
154

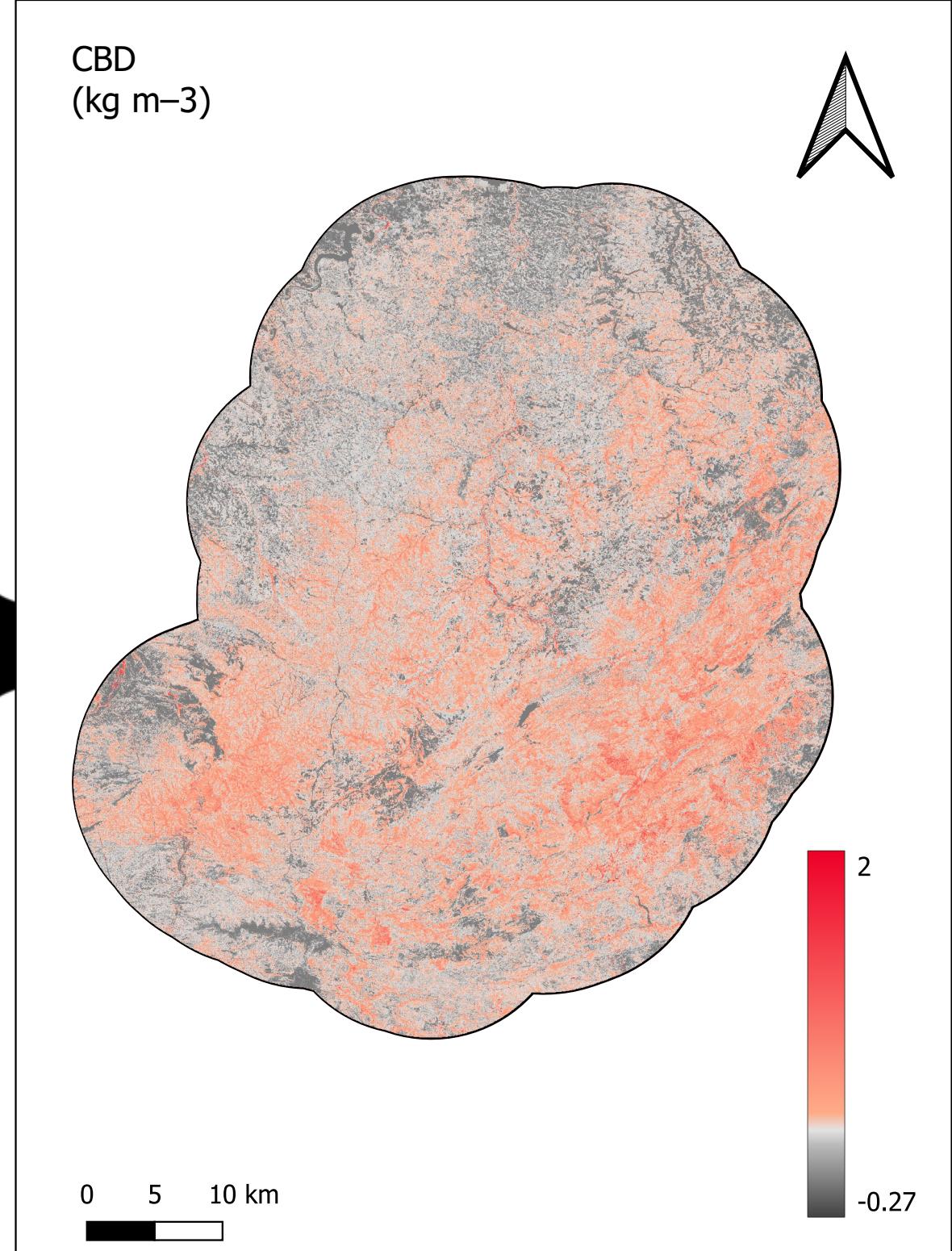
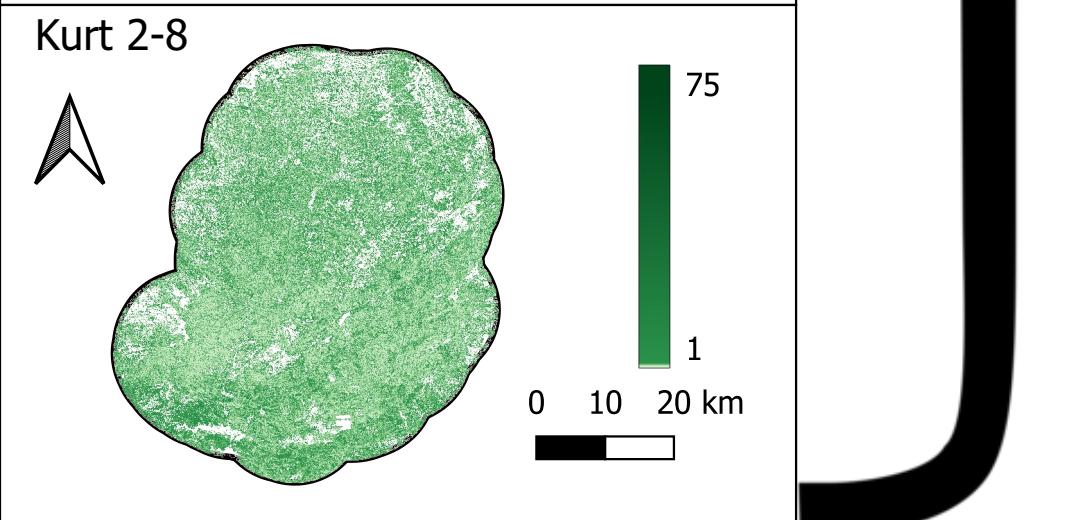
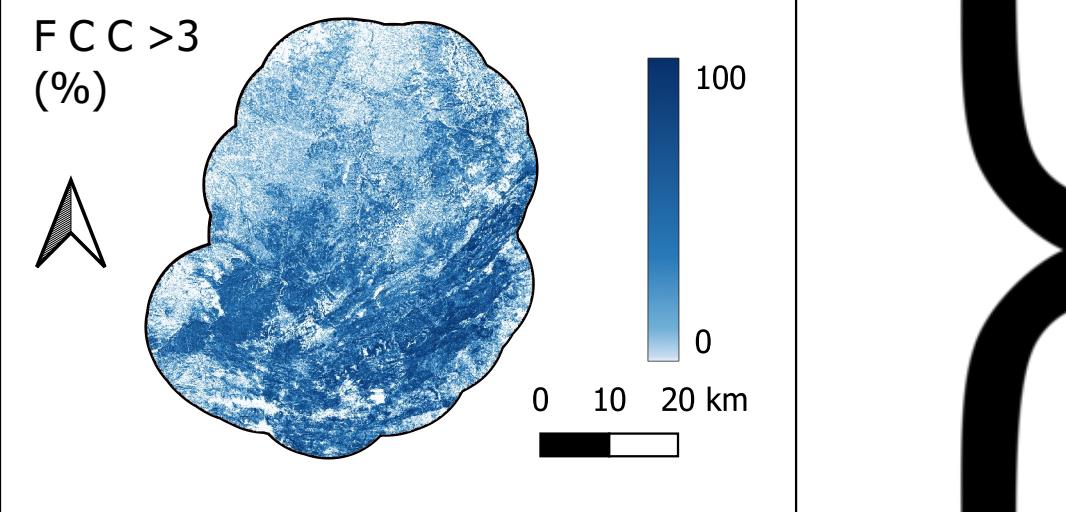
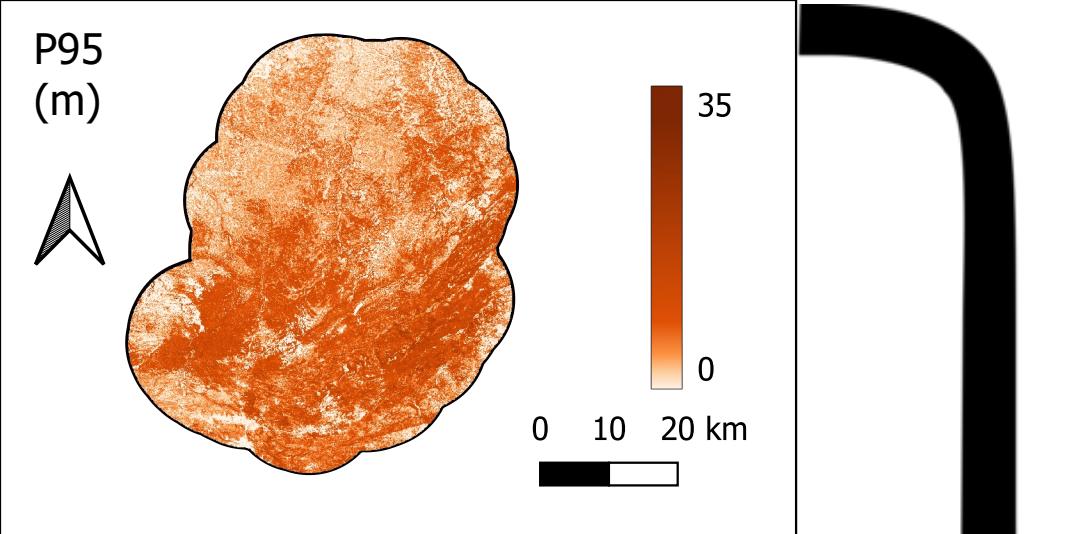
0 5 10 km



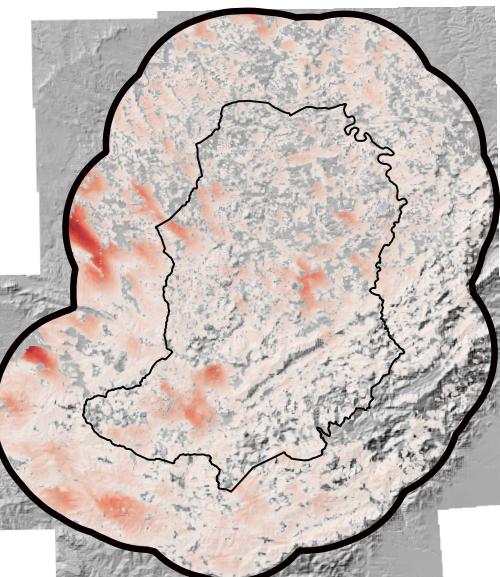
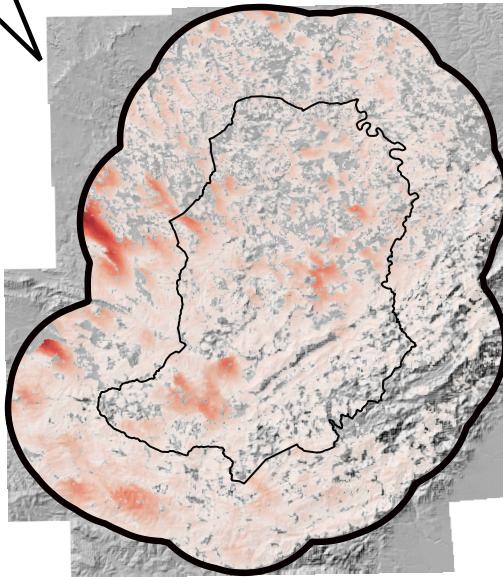
Formaciones arbóreas



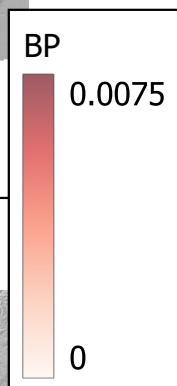
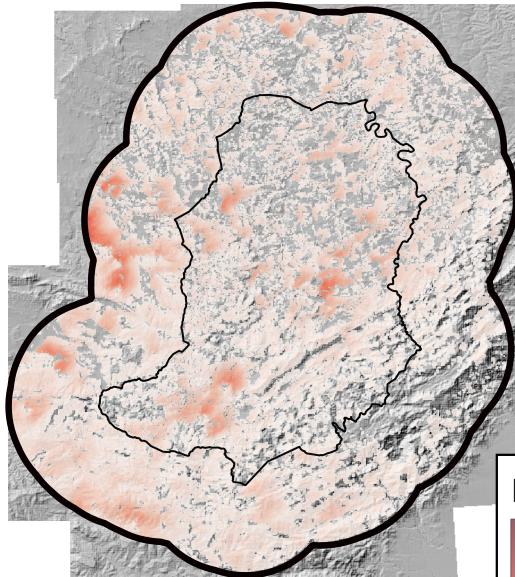
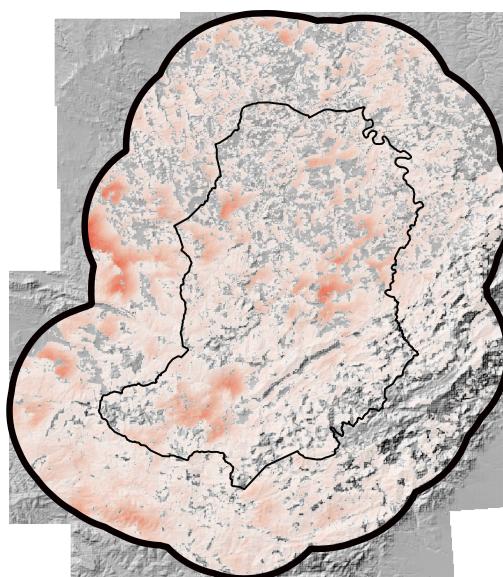




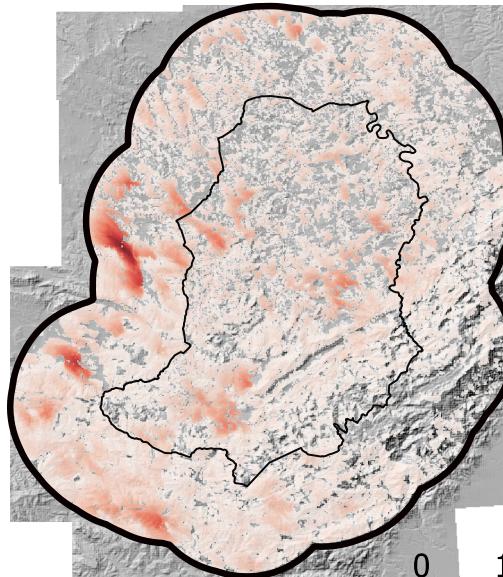
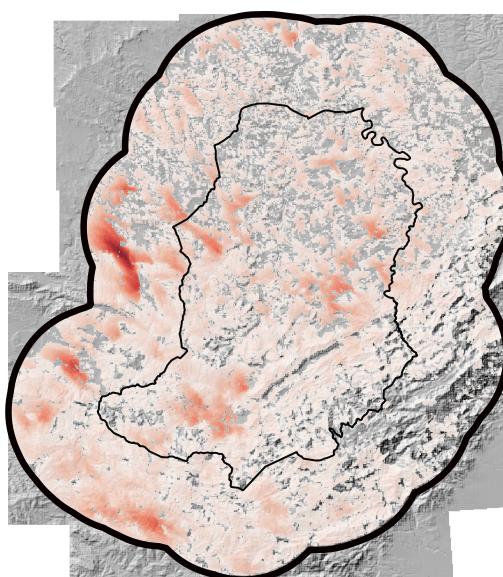
Situaciones del SO sin difluencia



Situaciones del SO con difluencia



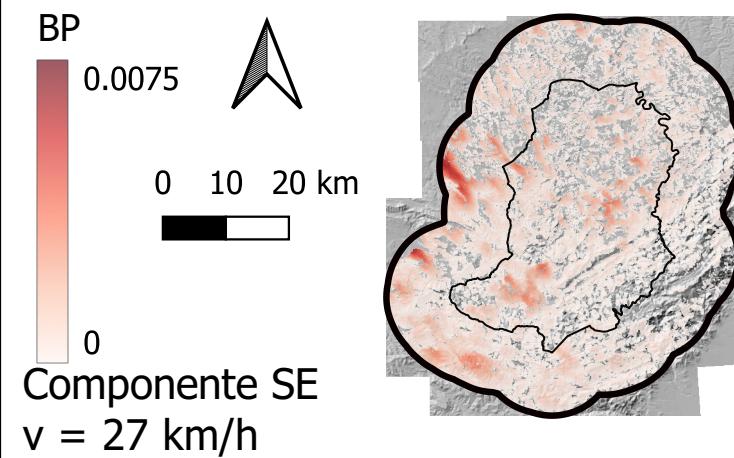
Situaciones del O



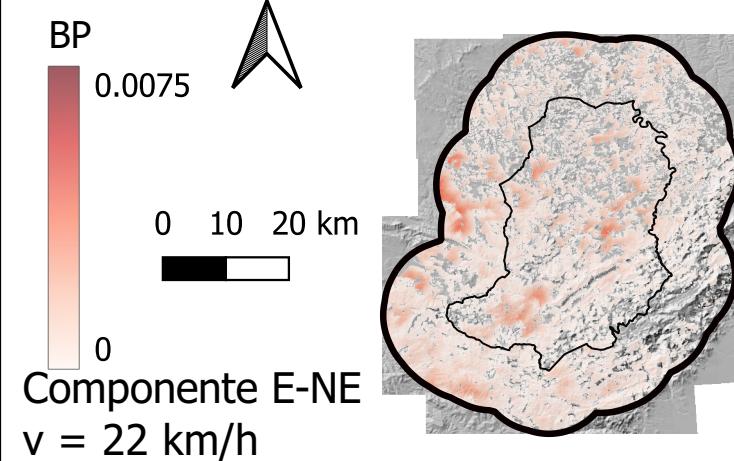
0 10 20 km



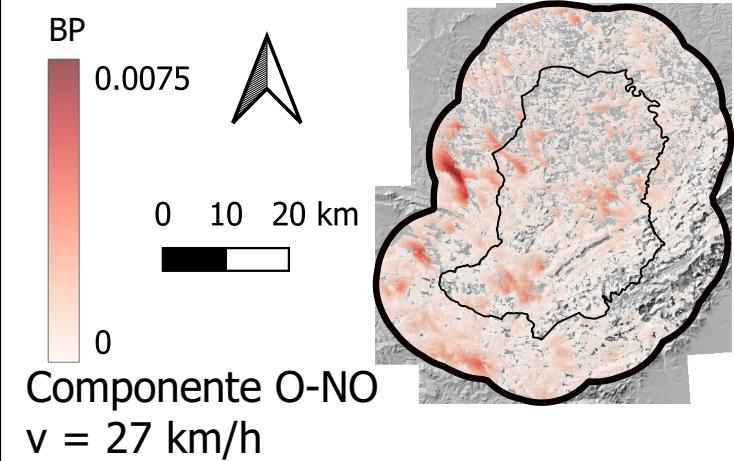
Situaciones del SO sin difusión



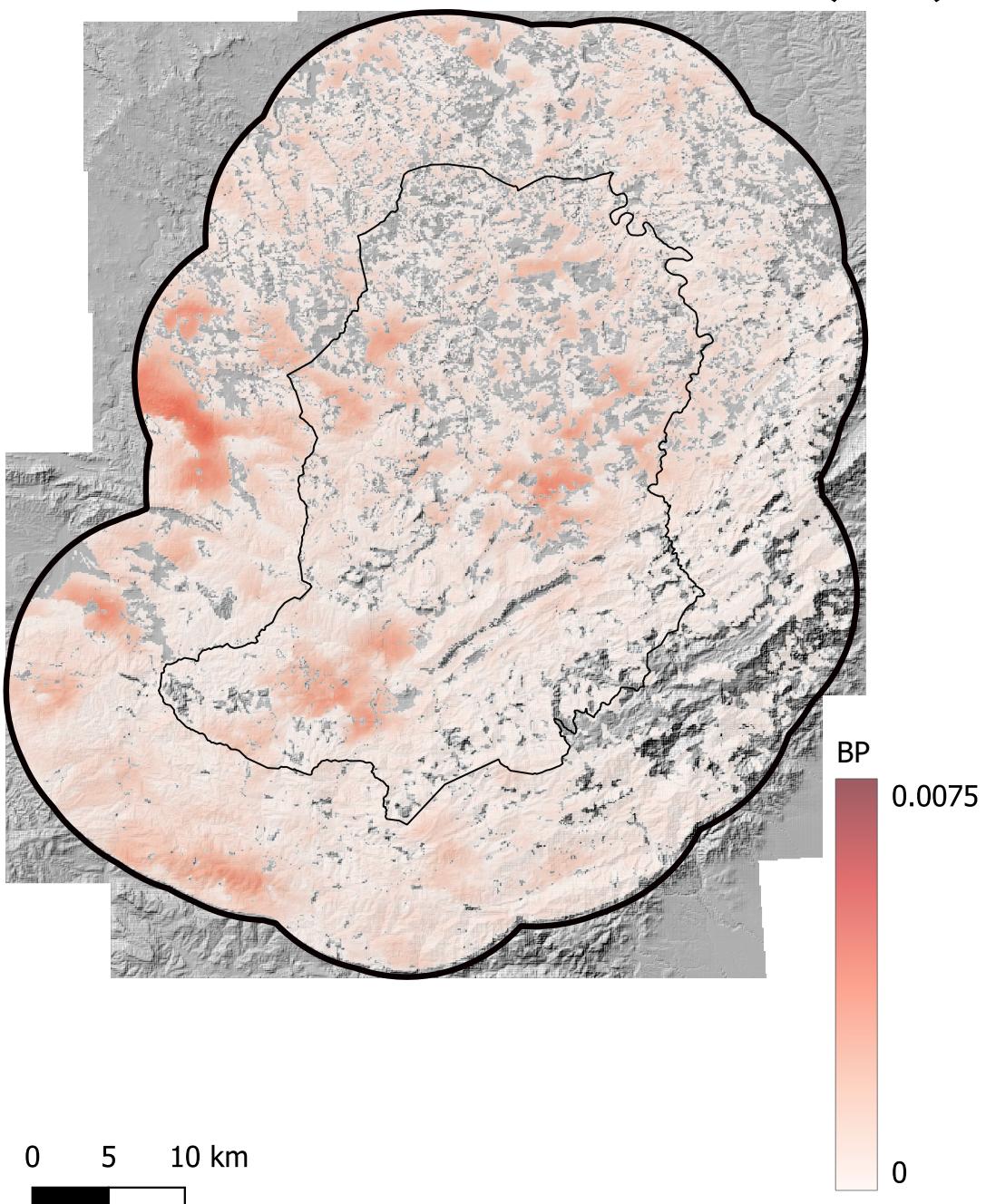
Situaciones del SO con difusión



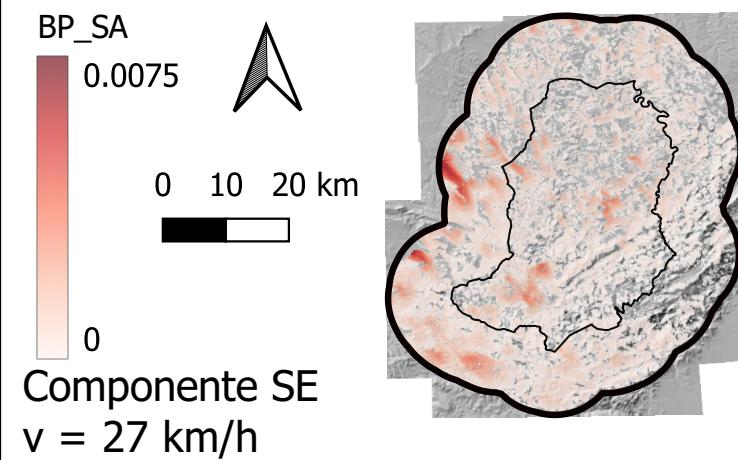
Situaciones del O



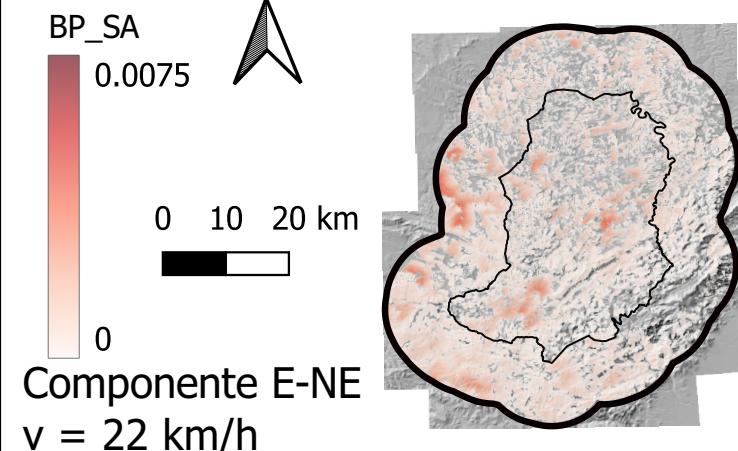
Escenario Actual



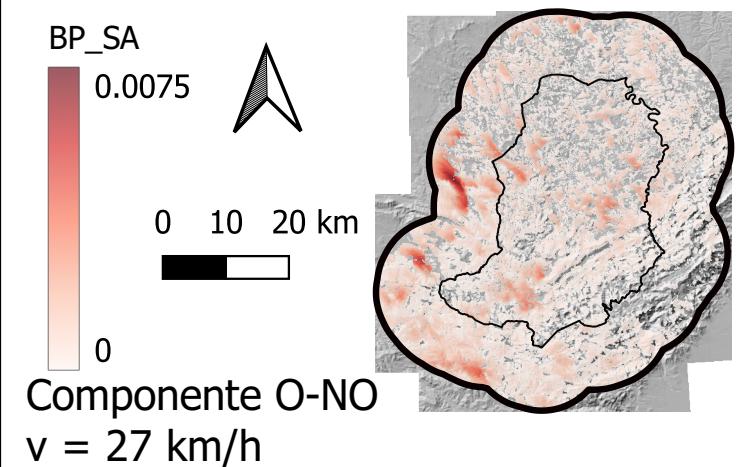
Situaciones del SO sin difusión



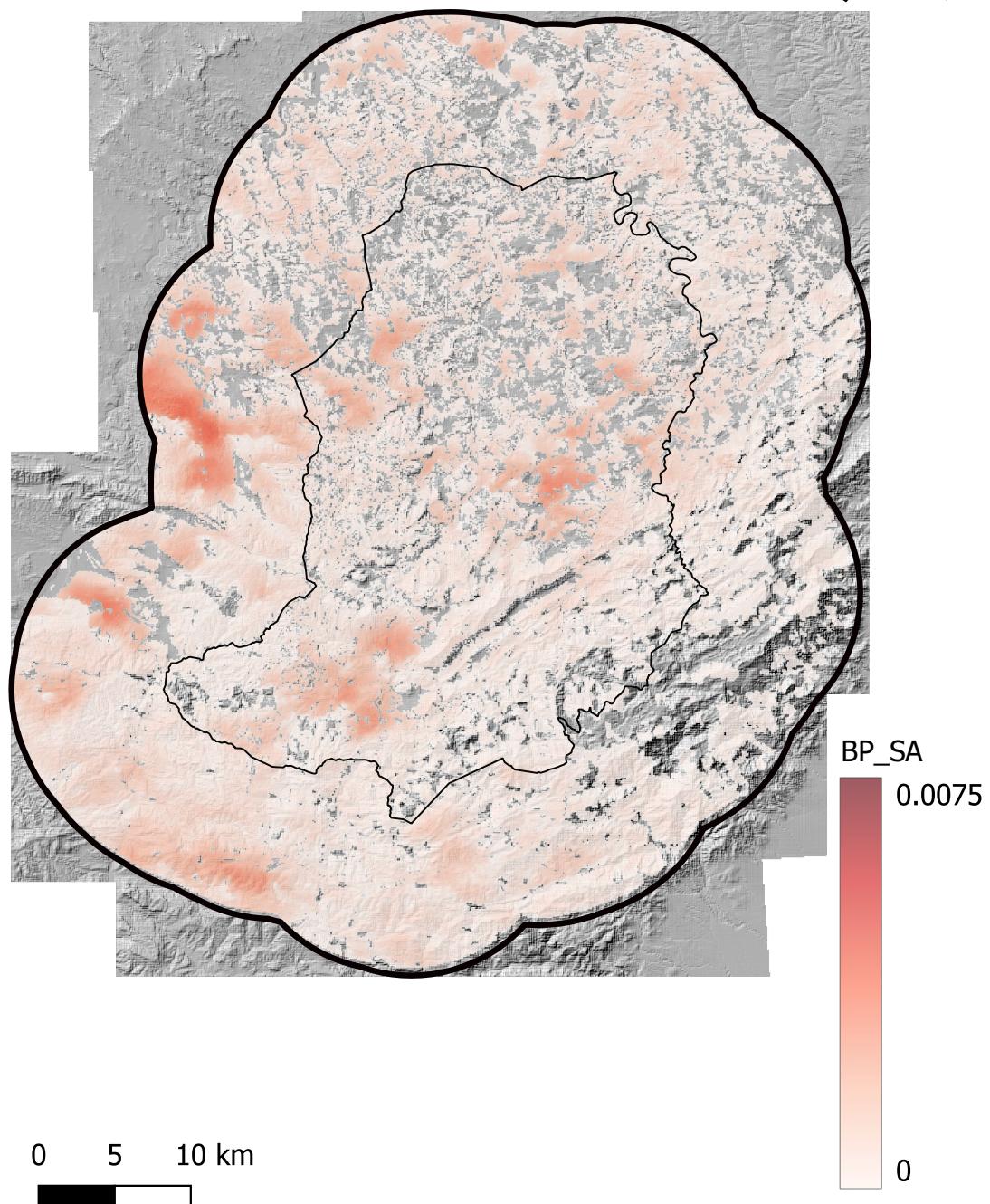
Situaciones del SO con difusión



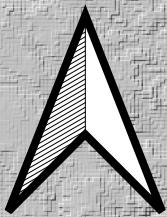
Situaciones del O



Escenario Sin Abandono Agrario



BP Escenario Actual



BP

0.004

0

Leyenda

■ Edificios BTN

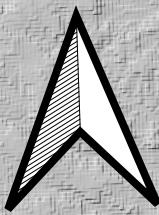
□ Límite de la Comarca del Matarrana

0

5

10 km

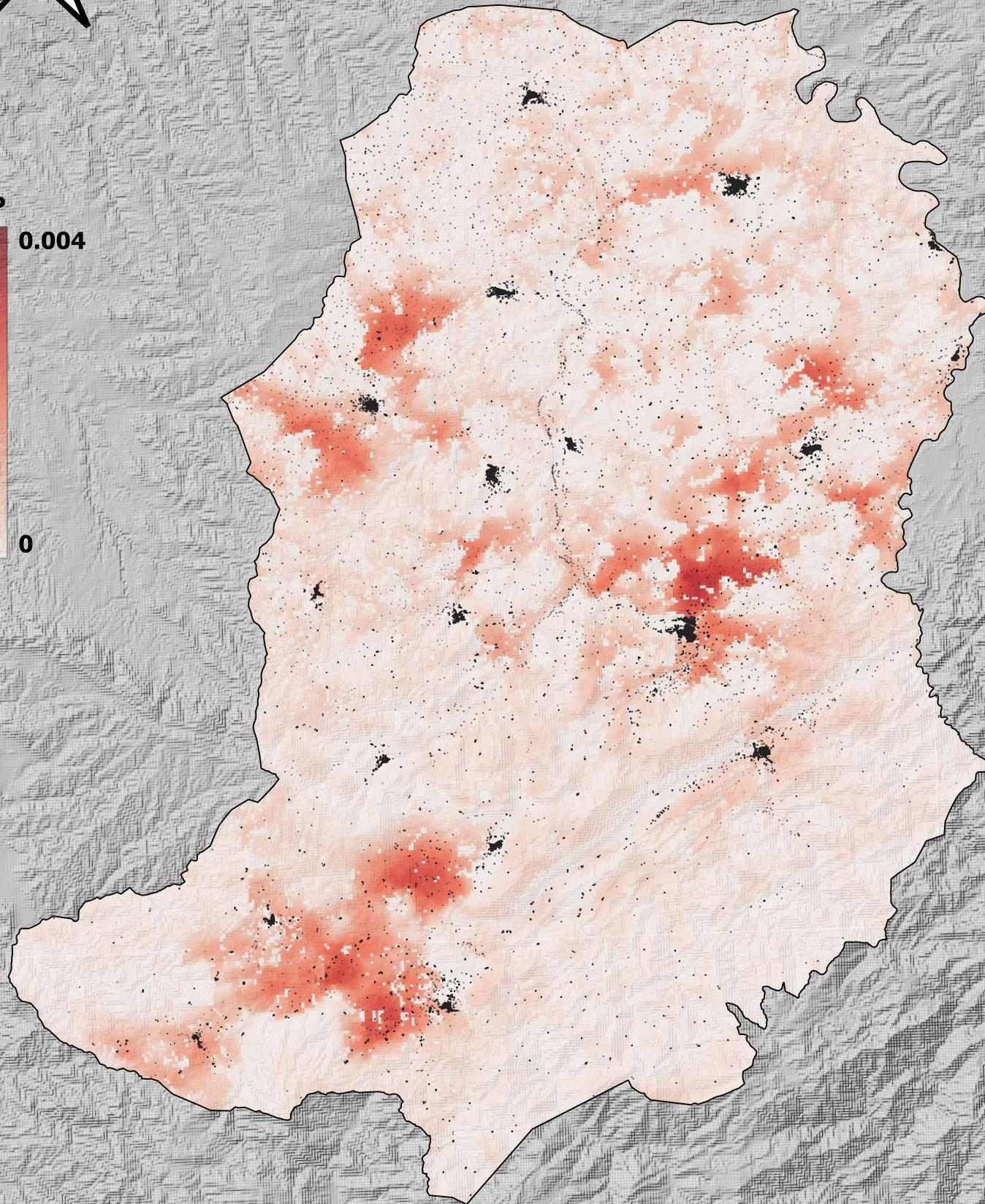
BP Escenario Sin Abandono Agrario



BP

0.004

0



Leyenda

■ Edificios BTN

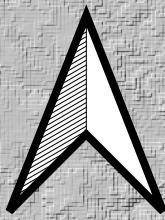
□ Límite de la Comarca del Matarrana

0

5

10 km

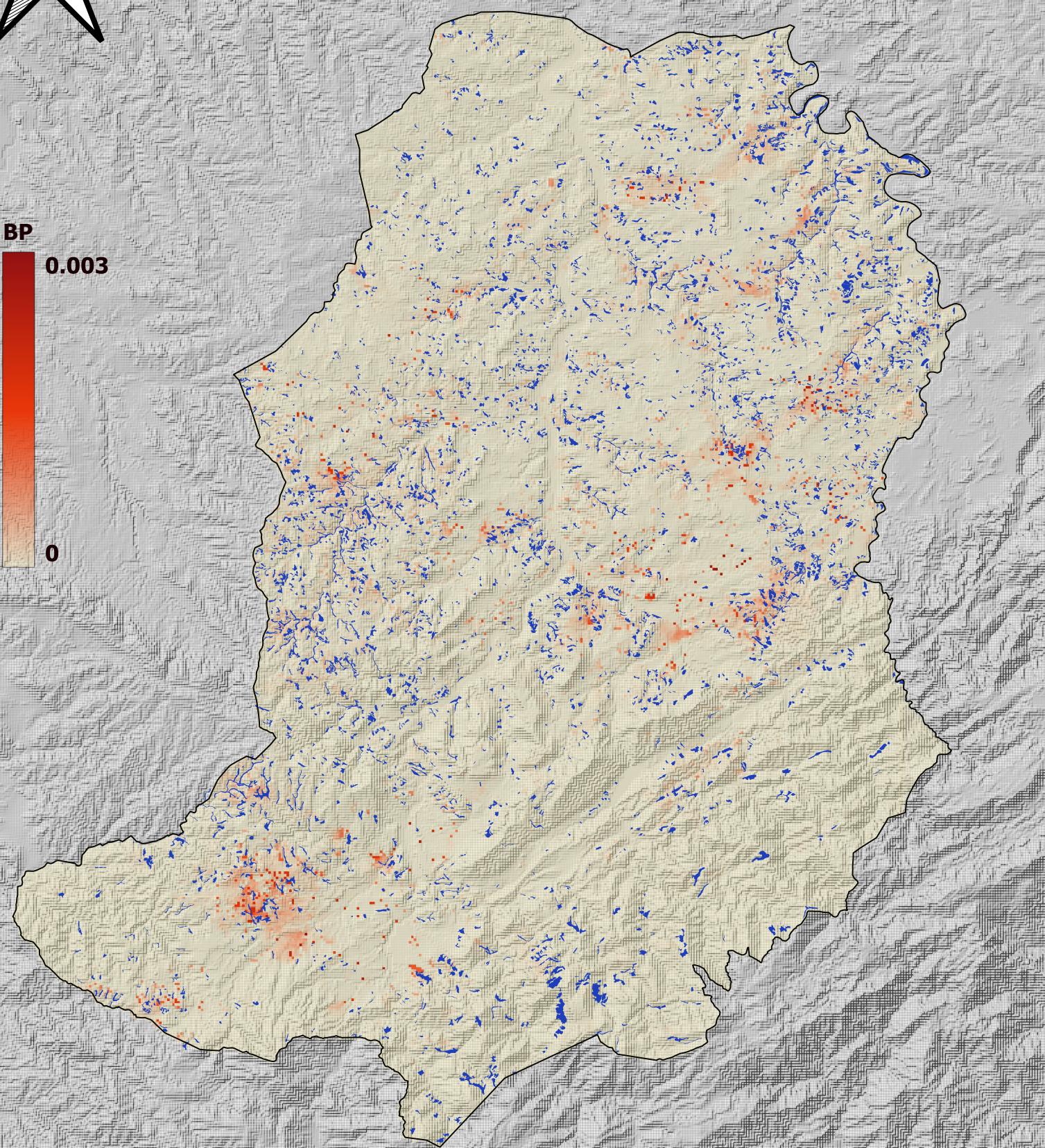
Variación de la probabilidad de incendio entre escenarios



BP

0.003

0



Leyenda

- Límite de la Comarca del Matarraña
- Cartografía de parcelas abandonadas Ric e Ibarra (2015)

0 5 10 km