



**Universitat de les
Illes Balears**

Facultat de Filosofia i Lletres

Memòria del Treball de Fi de Grau

Evolució coberta vegetal post-incendi a partir dels índexs de vegetació NDVI i EVI

Antoni Puig Mora

Grau de Geografia

Any acadèmic 2022-23

Treball tutelat per Mauricio Ruiz Pérez

Departament de Geografia

S'autoritza la Universitat a incloure aquest treball en el Repositori Institucional per a la seva consulta en accés obert i difusió en línia, amb finalitats exclusivament acadèmiques i d'investigació	Autor		Tutor	
	Sí	No	Sí	No
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Paraules clau del treball:

Incendi forestal, MODIS,EVI,NDVI, recuperació coberta forestal

Índex

1. Introducció	4
2. Justificació del tema, objectius i estructura del treball.....	5
3. Estat de l'art	6
4. Casos d'estudi	8
5. Metodologia	11
6. Resultats	17
7. Discussió	32
8. Conclusions	35
9. Referències bibliogràfiques.....	38
10. Annex	41

Índex de taules

Taula 1 Mann-Kendall Andratx.....	20
Taula 2 Mann-Kendall Yeste.....	25
Taula 3 Mann-Kendall Grandas de Salime.....	30

Índex de figures

Figura 1 Mapa localització incendi Andratx 2013 Font: Ortofoto -PNOA 2021-, punts –FIRMS- (NASA)	8
Figura 2 Mapa localització incendi Yeste 2017 Font: Ortofoto -PNOA 2021-, punts –FIRMS- (NASA).....	9
Figura 3 Mapa localització incendi Grandas de Salime 2017. Font: Ortofoto -PNOA 2021-, punts –FIRMS- (NASA)	10
Figura 4 Esquema metodològic de la investigació	12
Figura 5 [a] Cartografia Corine Land Cover de l'incendi d'Andratx 2013. [b] Gràfic d'anàlisi comparat de % ocupació del sòl.....	18
Figura 6 Evolució de l'Índex EVI de la zona cremada Andratx, 2011-2017.....	19
Figura 7 Evolució de l'índex NDVI de la zona cremada Andratx 2011-2017.....	20
Figura 8 Resultats de Decomposition RStudio de EVI(a) i NDVI(b) Andratx.....	22
Figura 9 [a] Cartografia Corine Land Cover de l'incendi de Yeste 2017. [b] Gràfic d'anàlisi comparat de % ocupació del sòl.....	23
Figura 10 Evolució de l'índex EVI de l'incendi de Yeste, 2015-2022.....	24
Figura 11 Evolució de l'índex NDVI de l'incendi de Yeste, 2015-2022	25
Figura 12 Resultats de Decomposition RStudio de EVI (a) i NDVI (b) Yeste.....	27
Figura 13 [a] Cartografia Corine Land Cover de l'incendi de Grandas de Salime 2017. [b] Gràfic d'anàlisi comparat de % ocupació del sòl.....	28
Figura 14 Evolució de l'índex EVI de l'incendi de Grandas de Salime, 2015-2022.....	29
Figura 15 Índex NDVI de l'incendi de Grandas de Salime, 2015-2022.....	30
Figura 16 Resultats de Decomposition RStudio de EVI a i NDVI b Grandas de Salime.....	32
Figura 17 Climograma Andratx entre els anys 1999-2019.....	41
Figura 18 Qualitat dels resultats obtinguts del cas Andratx, AppEEARS	41
Figura 19 Anàlisi de la tendència de EVI del cas Andratx, 2011-2017	42
Figura 20 Tendència NDVI Andratx, 2011-2017.....	42
Figura 21 Índex d'estacionalitat de l'EVI del cas Andratx, 2011-2017	43
Figura 22 Índex d'estacionalitat Andratx NDVI, 2011-2017	43

Figura 23 Climograma Yeste entre els anys 1999-2019.....	44
Figura 24 Qualitat dels resultats obtinguts del cas de Yeste, 2015-2022	44
Figura 25 Tendència EVI Yeste, 2015-2022	45
Figura 26 Tendència NDVI Yeste, 2015-2022.....	45
Figura 27 Índex d'estacionalitat de l'EVI del cas de Yeste, 2015-2022.....	46
Figura 28 Índex d'estacionalitat de l'NDVI del cas de Yeste, 2015-2022	46
Figura 29 Climograma Grandas de Salem entre els anys 1999-2019	47
Figura 30 Qualitat dels resultats obtinguts de Grandas de Salime, AppEEARS	47
Figura 31 Tendència EVI Grandas de Salime, 2015-2022	48
Figura 32 Tendència NDVI Grandas de Salime, 2015-2022.....	48
Figura 33 Índex d'estacionalitat de l'EVI del cas Grandas de Salime, 2015-2022	49
Figura 34 Índex d'estacionalitat de l'NDVI del cas Grandas de Salime, 2015-2022	49

Resum:

Aquest estudi analitza la recuperació de la cobertura vegetal després d'incendis forestals en tres ubicacions diferents d'Espanya amb diferents característiques climàtiques, però amb incendis de dimensions similars. Mitjançant l'ús d'imatges satel·litals es va obtenir el perímetre dels incendis així com l'evolució dels índex EVI (Enhanced Vegetation Index) i NDVI (Normalized difference vegetation index) per les àrees afectades pel foc. Les dades es van extreure del satèl·lit MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) mitjançant les eines FIRMS (Fire Information for Resource Management System) i AppEEARS (Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration). Els resultats indiquen una recuperació de la vegetació després de l'incendi en les tres àrees analitzades: una a la costa mediterrània (Andratx), una a l'interior de la península (Yuste) i una a la costa atlàntica (Grandas de Salime). En tots els casos, la recuperació no només retornà als nivells previs a l'incendi, sinó que la vegetació millorà, com indiquen les rectes de regressió i el test Mann-Kendall. L'anàlisi EVI i NDVI permet determinar el moment exacte de l'incendi, l'efecte de la temporalitat relacionada amb el clima de la zona sobre la vegetació i l'estat de salut de la vegetació abans i després de l'incident. Els resultats també indiquen que la recuperació és més ràpida a la costa atlàntica. En contraposició, a la costa mediterrània es registren els efectes més importants sobre la vegetació, on els indicadors disminueixen més després de l'incendi i la recuperació és més lenta.

1. Introducció

El present treball se centra en fer una anàlisi de la recuperació de la coberta vegetal de diverses zones afectades per incendis forestals a partir de l'estudi de l'evolució dels índexs de vegetació obtinguts a partir d'imatges de satèl·lit. Els incendis forestals — entenent com la crema descontrolada d'un bosc i la seva massa vegetal— són una de les majors amenaces de destrucció dels ecosistemes forestals, tot i això es poden evitar mitjançant una ràpida detecció i un control eficient de la massa forestal. En els darrers temps la preocupació per aquesta amenaça natural ha augmentat i es qüestiona la seva relació amb el canvi climàtic (Jones et al., 2022). Els incendis forestals són molt perjudicials perquè generen entre d'altres efectes: una degradació del sòl, l'emissió de grans quantitats d'emissió de diòxid de carboni a l'atmosfera, contribuint al canvi climàtic, i el més important és la degradació i pèrdua dels ecosistemes forestals (Bodi et al., 2012; Caon et al., 2014). Segons Ubeda Cartaña et al., (2021) un incendi forestal es produeix quan diversos materials combustibles situats a una àrea de vegetació són consumits de forma incontrolable pel foc. Les seves conseqüències són encara més preocupants quan es repeteixen en una zona, ja afectada prèviament per un incendi forestal incidint molt negativament el medi ambient, la fauna, vegetació i la comunitat que formen (Novo et al., 2020).

A causa del canvi climàtic, i especialment de l'increment d'escalfament global s'ha detectat un augment en el nombre d'incendis a Espanya. A més, aquests incendis són de cada vegada més ràpids i més intensos. Els incendis de grans dimensions són més freqüents a la vessant mediterrània, tot i que en podem trobar arreu del territori espanyol (Ubeda Cartaña et al., 2021).

En els darrers decennis s'ha incrementat l'atenció de la literatura científica quant a l'estudi dels incendis forestals. Una part dels treballs es centren en millorar la seva detecció primerenca i millorar la seva delimitació. Dintre d'aquesta branca d'estudis destaca l'ús de imatges de satèl·lit per al càlcul de l'índex normalitzat de vegetació (NDVI) o de l'índex millorat de vegetació (EVI) que ajuda a determinar les dinàmiques de recuperació de la vegetació post-incendi. En aquesta línia destaquen els treballs de João et al. (2018) i Buma (2012).

Aquest incideix en l'estudi de la monitorització de la recuperació de la coberta forestal després d'un incendi (Alonso-Betanzos et al., 2003). El procés de recuperació és clau per mantenir la diversitat i la salut dels ecosistemes, a més del subministrament de serveis ambientals com poden ser: la conservació del sol, la regulació del clima i la provisió de l'aigua, que es manté molt millor en sol en cobertura més que en un sol ras (Costa et al., 2017).

L'estudi presenta una anàlisi de la recuperació de la coberta vegetal de tres incendis ocorreguts a la península Ibèrica la passada dècada i a la vegada posa en marxa una metodologia de monitorització basada en l'ús d'imatges de satèl·lit que permet avaluar el procés de recuperació de la coberta vegetal.

2. Justificació del tema, objectius i estructura del treball

La selecció del tema està motivada pel fet que els incendis forestals són una de les amenaces naturals més importants que afecten a nivell mundial i especialment a l'àmbit mediterrani, i que les dinàmiques provocades pel canvi climàtic i els canvis als usos del sòl ens indiquen que cada vegada incrementaran la seva freqüència i extensió. Aquest és un tema de màxima actualitat que genera l'interès i inquietud a la població, per la qual cosa té un gran potencial per ser investigat (Ubeda Cartaña et al., 2021).

La hipòtesi principal del treball és la següent: els factors climàtics poden tenir una incidència fonamental en la recuperació dels ecosistemes forestals post-incendi.

L'objectiu general del treball és avaluar les dinàmiques de recuperació de la vegetació post-incendi i constatar si ha hagut una bona recuperació de la vegetació després del pas del foc. Es tracta d'identificar si el pas d'un incendi que ha afectat una zona forestal suposa la desaparició de la coberta vegetal, perquè no és capaç de recuperar-se de la destrucció causada per l'incendi, o si per altra banda la vegetació es recupera i torna al seu estat original previ al pas de les flames i pèrdua temporal de la vegetació.

Els objectius específics són els següents:

- Delimitar les àrees afectades pels incendis forestals a partir de anàlisi d'imatges satel·litals.

- Analitzar l'evolució dels usos del sòl de les zones afectades per incendis forestals mitjançant l'anàlisi comparada de cartografia de cobertes vegetals procedents del Corine Land Cover (UE).
- Avaluar les dinàmiques d'evolució dels índexs de vegetació NDVI i EVI a les àrees afectades per incendis forestals.
- Determinar la importància del clima i l'estacionalitat en l'estat de la vegetació i el seu rol en la recuperació post-incendi.

Per al desenvolupament del treball s'han seleccionat tres casos d'estudis corresponents a tres incendis històrics de gran magnitud que es varen produir a la Península Ibèrica que es troben a tres regions bioclimàtiques diferents (Aemet, 2011). Així es comptarà amb una sèrie temporal del índexs NDVI i EVI dels casos d'estudi que ens permetrà poder assolir els objectius establerts. (Lacouture et al., 2020; Ma et al., 2020).

L'estructura del treball és la següent: en primer terme es realitza un estudi a l'estat de l'art, en aquest cas ús de la tècnica NDVI i EVI per determinar estat de la vegetació i detecció d'incendis i l'àrea afectada; en segon lloc, es presenten les àrees d'estudi i les seves principals característiques geogràfiques; a continuació s'exposa la metodologia per dur a terme l'estudi, en la qual és detallen les fonts consultades i els processos analítics aplicats; es segueix amb la presentació dels principals resultats obtinguts; finalment per concloure, s'inclou una discussió dels resultats obtinguts, així com unes conclusions.

3. Estat de l'art

Els incendis forestals i l'anàlisi dels seus efectes és un tema de treball força estudiat (Ubeda Cartaña et al., 2021) malgrat això una línia menys explorada és la recuperació de la vegetació després dels incendis i l'avaluació d'una possible relació de les dinàmiques de recuperació amb els factors climàtics (Jones et al., 2022).

D'entre els estudis que analitzen el comportament dels índexs NDVI i EVI en relació amb els incendis forestals hi destaquem els següents: el procés de recuperació de la cobertura vegetal després de l'incendi a Colombia Click or tap here to enter text. (Capador Aguilar et al., 2021); l'ús de les imatges MODIS per observar els efectes de recuperació de la vegetació després de l'incendi (Van Leeuwen, 2008); ús de l'índex NDVI per l'avaluació d'incendis (João et al., 2018); evolució de l'índex NDVI en un cas d'un

incendi d'un bosc a l'estat de Colorado, USA (Buma, 2012); detecció de canvis temporals i espacials de la vegetació, que permeten el monitoratge de la degradació o recuperació de l'habitat (Pettorelli, 2013) anàlisi de la coberta vegetal post-incendi (Fiore et al., 2020); evolució de l'índex l'NDVI a l'illa North Evia (Gemitzi & Koutsias, 2022); la comparació de sèries temporals NDVI post-incendi (Verbesselt et al., 2010); les tendències de la productivitat de l'ecosistema per tenir en compta les variables a l'hora d'analitzar les sèries temporals de dades (Forkel et al., 2013).

Pel que fa a estudis a l'estat espanyol destaquem diversos treballs: detecció de zones amb risc d'incendi i delimitació d'àrees d'actuació a Galícia (Alonso-Betanzos et al., 2003); anàlisi dels efectes dels incendis en la vegetació de la costa Mediterrània (Ugarte et al., 2021); anàlisi de risc d'incendis a partir d'imatges LiDAR (Novo et al., 2020); monitoratge de la vegetació a través de les imatges satel·litàries (Malak & Pausas, 2006); anàlisi de la capacitat del NDVI per determinar la severitat dels incendis en tres casos del sud d'Espanya (Escuin et al., 2008); càlcul del NDBR (Normalized Burn Ratio) que fa referència a la severitat i intensitat de l'incendi (Flores Rodríguez et al., 2021).

Per al cas de les Balears, el treball de Bernard Ginard (2017) aprofundeix sobre la recuperació vegetal a través d'imatges Landsat (Bernard Ginard, 2017).

A part d'aproximacions basades en l'ús de la teledetecció, també hi ha autors que promouen l'ús de les eines analítiques dels sistemes d'informació geogràfica per a l'anàlisi integrada dels incendis, la seva gènesi i els seus efectes (Chuvieco et al., 2007; Eugenio et al., 2016).

A més també s'ha desenvolupat una línia que investiga la utilització de les imatges per satel·lit i l'ús d'eines com el FIRMS per detectar les zones on hi està ocorrent un incendi en temps real (Tentor et al., 2015).

4. Casos d'estudi

4.1. Incendi d'Andratx (Andratx, Illes Balears) de l'any 2013

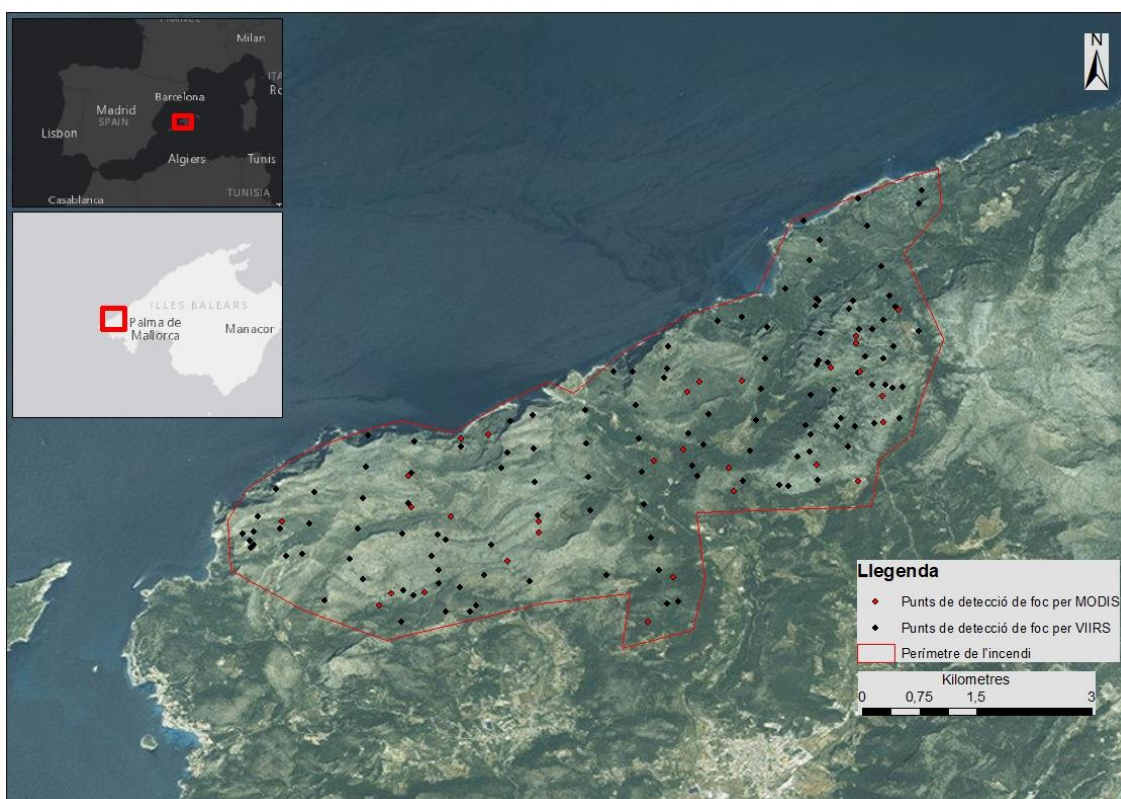


Figura 1 Mapa localització incendi Andratx 2013 Font: Ortofoto -PNOA 2021-, punts -FIRMS- (NASA)

En primer lloc, s'analitza el cas de l'incendi d'Andratx iniciat el 26 de juliol i extingit el 13 d'agost de 2013, afectant una superfície de 2.335 hectàrees, el que representa el 2% de la Serra de Tramuntana i convertint-se en l'incendi més gran de la història de Balears. L'incendi va afectar principalment el municipi d'Andratx, però també el d'Estellencs i Calvià. La zona forestal correspon en dues terceres parts a tipologia vegetal d'arbusts i carritxeres i una tercera és de pinar (Carriqui, 2019). Les condicions meteorològiques varen propiciar una ràpida expansió. A més, el clima de la zona afectada correspon a Mediterrani Csa que destaca per tenir el mes més calorós per damunt dels 22 graus, pluges als mesos més freds de l'any, hiverns suaus i estius calorosos; segons la classificació Köppen-Geiger¹. Pel que fa a la casuística, la investigació posterior va determinar que l'incendi va ser provocat per una negligència humana (Bernard Ginard, 2017).

¹ Per veure quin és el règim de precipitacions d'aquest clima i l'evolució de les temperatures al llarg de l'any es pot consultar a l'annex el climograma del municipi afectat a l'annex del treball.

4.2. Incendi de Yeste (Albacete) l'any 2017

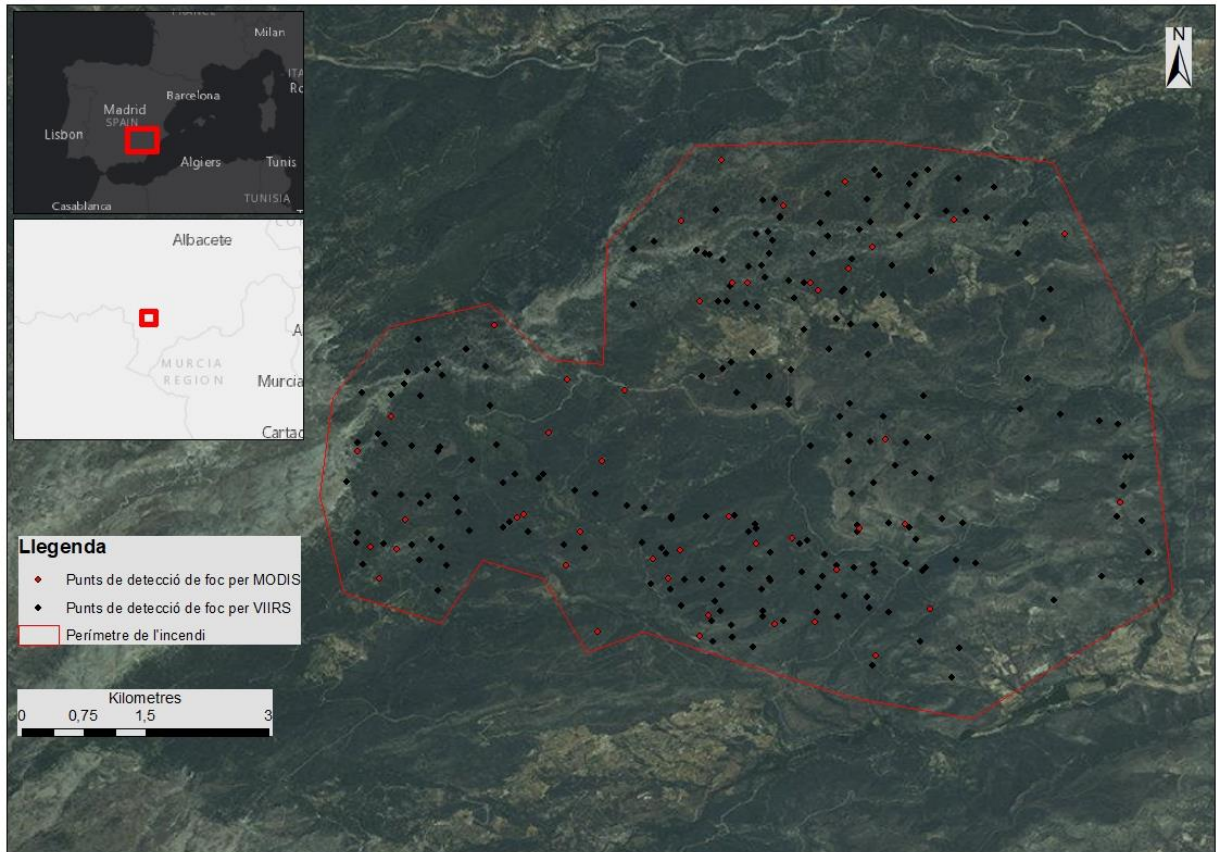


Figura 2 Mapa localització incendi Yeste 2017 Font: Ortofoto -PNOA 2021-, punts -FIRMS- (NASA)

En segon lloc, s'analitza el cas de l'incendi de Yeste, Sierra del Segura província d'Albacete, del 27 de juliol de 2017 i extingit vuit dies després. L'incendi va afectar una superfície de 3.200 hectàrees, 745 de les quals formaven part del Parc Natural de Calares del Río y la Cima. Dintre de la zona afectada el nivell de destrucció va arribar al 85%.

El clima del municipi entra dintre de la classificació Bsh semiàrid temperat, segons la classificació Köppen-Geiger. La característica principal és que la temperatura anual està per davall dels 18 graus i té escasses precipitacions².

Fins a quasi 1.200 persones varen haver de ser evacuades i l'incendi va ser d'important repercussió, pel fet d'afectar una zona protegida d'alt valor ecològic i que les

² Per més detall es pot consultar el climograma adjunt a l'annex.

condicions meteorològiques ajudaren a propagar. En aquest cas, es desconeix la causa de l'incendi (RTVE, 2017).

4.3. Incendi de Grandas de Salime (Astúries) de l'any 2017.

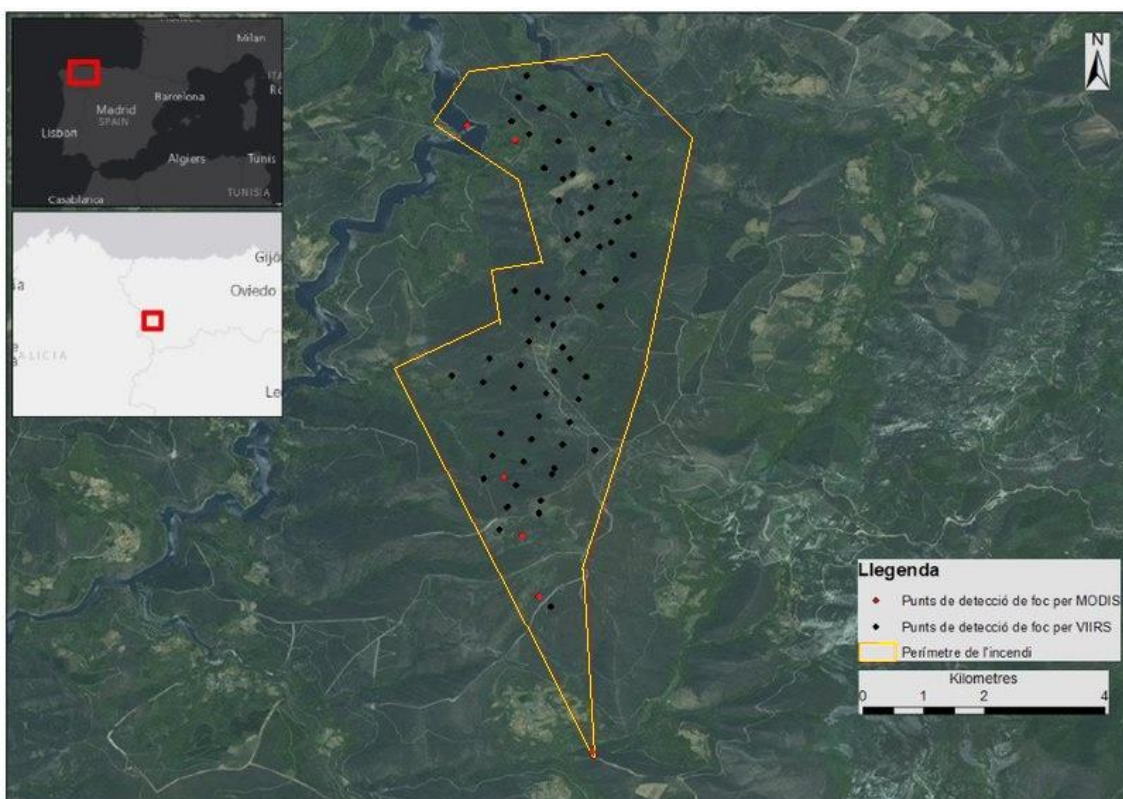


Figura 3 Mapa localització incendi Grandas de Salime 2017. Font: Ortofoto -PNOA 2021-, punts – FIRMS- (NASA)

En darrer lloc, tenim el cas de Grandas de Salime (Astúries) un dels focs que va afectar el nord-oest peninsular el 2017, afectant sobretot Portugal —on els incendis varen ser molt importants—, Galícia i Astúries, essent aquesta darrera la comunitat menys afectada i en tenir un model d'afectació semblant als altres dos casos en la zona escollida, és d'on extraurem el darrer cas d'estudi.

Es calcula que entre el 13 d'octubre i el 19 del mateix mes es varen perdre a Astúries 12.825 hectàrees repartides entre 42 municipis i fins a 107 incendis individuals. En total aquest període és un dels més rellevants de la Península Ibèrica pel que fa a incendis forestals, especialment intens a Portugal. El municipi més afectat presenta un clima Cfb oceànic templet segons la classificació de Köpper-Geiger. La seva característica principal és que la temperatura mitjana càlida no supera els 22 graus,

però es superen els 10 graus durant almenys quatre mesos a l'any³. Es calculen unes 800 hectàrees a l'incendi individual estudiat del municipi i 2.000 hectàrees al municipi veïnat de Cangas del Narcea. L'incendi va durar quatre dies i del total de les hectàrees cremades 350 eren de bosc de ribera. Una persona va ser condemnada en aquest cas per provocar l'incendi (Menéndez, 2017).

5. Metodologia

La majoria de fonts d'informació emprades per a la realització del treball són de lliure accés i tenen una cobertura pràcticament a nivell mundial, això permet replicar la metodologia per a l'estudi d'altres incendis ubicats a diverses latituds.

5.1. Fonts d'informació

Les fonts consultades són el FIRMS (Fire Information for Resource Management System), que proveeix dades ràster i vectorials proporcionades els satèl·lits MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer), i el VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite).

El MODIS és un satèl·lit de la NASA que disposa de dues versions: la primera incorporada al satèl·lit Terra que orbita des de l'any 1999, i la segona a bord del satèl·lit Aqua, que ho fa des de l'any 2002. Ambdues versions aporten dades de la temperatura de la superfície tant terrestre com oceànica, que permeten la detecció d'incendis: la funcionalitat que més ens interessa en el nostre cas i també informació del color de l'oceà, característiques de nuvolositat, concentracions d'aerosols i cartografia vegetal, que també ens pot ser d'utilitat.

Pel que fa al VIIRS, és un sensor que es troba a bord dels satèl·lits meteorològics NOAA-20, NOAA-21 i el Suomi NPP s'encarrega de recollir imatges i mesures radiomètriques de la terra, l'atmosfera, la criosfera i els oceans de les bandes visibles i infraroja de l'espectre electromagnètic. Té la capacitat de monitorar l'estat i canvis de la superfície vegetal i usos del sòl, que és el que ens interessa pel treball, a més d'altres capacitats relacionades amb la meteorologia (*About FIRMS | Earthdata*, s.d.; Tentor et al., 2015).

³ Per més informació es pot consultar el climograma a l'annex.

Quan a dades històriques d'ocupació del sòl comptem amb la font d'informació del Corine Land Cover (CLC): un projecte d'àmbit europeu que desenvolupa una base de dades de la cobertura i ús del territori dintre de la Unió Europea i dirigit per l'Agència Europea de Medi Ambient. El que ens interessa és poder consultar la catalogació que fan del sòl de les àrees afectades pels incendis forestals agafant classificacions d'abans i de després dels incendis. Això ens permetrà veure com ha canviat l'ús del sòl de la zona, quina és la seva evolució.

5.2. Processos desenvolupats

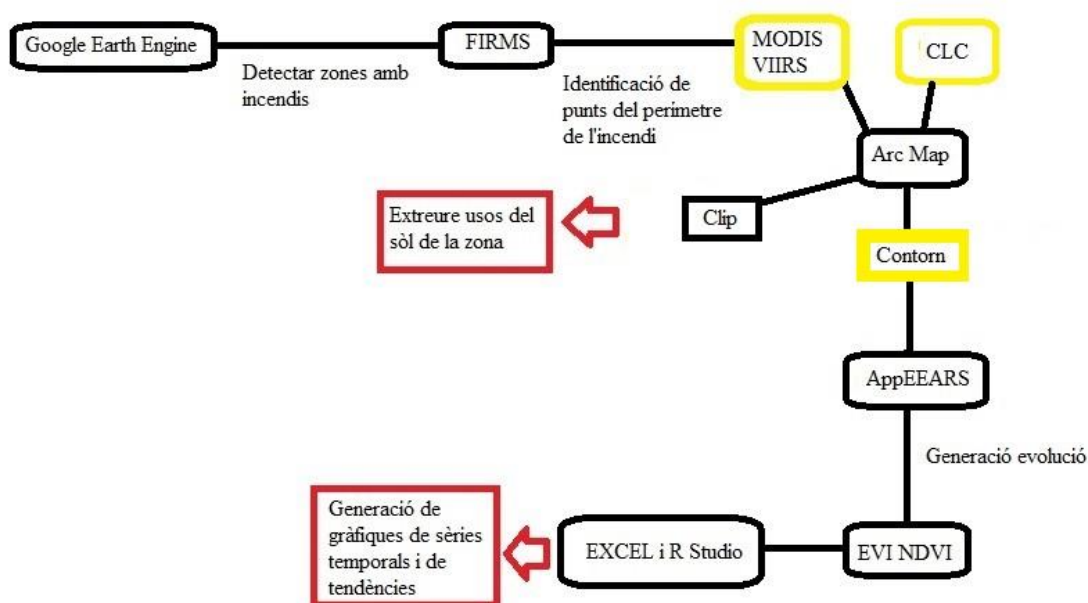


Figura 4 Esquema metodològic de la investigació

Les tasques realitzades són les següents:

- Identificació del perímetre dels incendis.

La primera de les tasques a realitzar és la identificació d'una zona que presenti anomalies tèrmiques que puguin ser indicatives d'incendi a través del portal de lliure accés de Google Earth Engine que permet visualitzar la font de dades FIRMS al llarg del temps. En el nostre cas varen cercar incendis entre l'any 2013 i el 2017, per tal de tenir marge suficient per poder dur a terme posteriorment la sèrie temporal de l'EVI i NDVI que inclourà dos anys anteriors a l'incendi i permetrà veure quin era l'estat que presentava la zona prèviament al pas del foc i

cinc anys posterior a l'incendi per observar l'evolució de la recuperació (Kumar & Mutanga, 2018) .

Un cop detectada la zona d'estudi sobre la qual volem obtenir la informació accedim a la consulta al portal del FIRMS —de gratuït accés per a tots els usuaris enregistrats i aportat per la NASA, administració aeronàutica del govern dels Estats Units— en què indicant la zona desitjada i el marc temporal ens donarà uns punts de referència sobre la zona on ha detectat les anomalies tant dels resultats del MODIS com el VIIRS per separat (Davies et al., 2009) .

Un cop disposem d'aquests punts de referència MODIS i VIIRS, podem passar a visualitzar-los a Arc Map vers 10.8 (ESRI) un programari amb el qual podem visualitzar, editar, crear i analitzar dades espacials. Es visualitzen les dades i es crea un nou fitxer vectorial (Shapefile) que permet guardar informació d'atributs i la ubicació geomètrica de l'incendi de la zona on ha detectat anomalies.

- Anàlisi dels canvis d'usos del sòl

Una vegada delimitada la zona de l'incendi, es selecciona la sèrie temporal Corine Land Cover anterior i posterior de l'incendi i s'avaluen els canvis dels usos del sòl. Això és possible perquè cada activitat té assignat un codi i veient com ha evolucionat la superfície que ocupen cada una de les activitats, es pot veure com ha modificat el paisatge l'incendi. En el nostre cas, les capes utilitzades són la CLC12 i la CLC18. A més, processem la informació agafant la superfície ocupada per cada ús del sòl dintre del perímetre de l'incendi i, a través d'EXCEL —un programari molt útil per a l'anàlisi de grans quantitats de dades—, extreim quin pes representa cada un d'aquests usos sobre el total, així es pot veure quins usos han guanyat o perdut importància a causa de l'incendi.

L'extracció dels usos del sòl per cada sèrie temporal es realitza mitjançant l'instrucció CLIP (RECORTAR) (Gemitzi & Koutsias, 2022).

- Avaluació de l'evolució dels índex NDVI i EVI

L'índex NDVI (Normalized Diferencial Vegetation Index) és un indicador de la salut de la vegetació, inclou quantitat, qualitat i desenvolupament de la vegetació. Es calcula a partir de la fórmula expressada en (1), on NIR-Red representa el reflex de la llum infraroja i NIR+Red és el reflex de la llum visible. Aquestes variables són captades

pel MODIS13Q1.006 en el nostre cas. Com major és l'activitat fotosintètica de la vegetació, més reflectivitat de la banda de la llum infraroja es troba i menor la de la llum visible. La ràtio obtinguda entre ambdues bandes genera un resultat al qual se li atorga un valor del 0 a l'1 per la vegetació que determina el seu estat de salut: com més proper al zero es troba, menys salut presenta la vegetació i com més a l'un, millor serà el seu estat (João et al., 2018). L'NDVI s'ha aplicat als tres casos d'estudi.

$$- \quad NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red) \quad (1)$$

L'índex EVI (Enhanced Vegetation Index) és com el seu nom reflecteix un indicador que permet monitorar i dur un seguiment precís de l'estat de la vegetació. Al contrari que NDVI, aquest indicador és més resistent al renou atmosfèric i la saturació de la imatge que puguin causar interferències en els resultats. L'EVI es calcula seguint la fórmula de l'expressió (2) on NIR, Red i Blue són correccions dels reflexos atmosfèrics de la imatge; L és un ajustament de la transparència del fons; C1 C2 són els indicadors de resistència dels aerosols, que s'utilitza de la banda Blue per corregir influència a la banda Red de la imatge i G és el factor de guany. (Lacouture et al., 2020). L'EVI ha estat utilitzat en els tres casos d'estudi.

$$- \quad EVI = G \times (NIR - Red)/(NIR + C1 \times Red - C2 \times Blue + L) \quad (2)$$

És interessant consultar les dues variables perquè són complementàries i permeten contrastar els resultats per dues vies diferents. Mentre que NDVI mesura la clorofil·la, EVI és sensible a variacions estructurals de la coberta vegetal. Conjuntament, funcionen millor per la detecció de canvis en la vegetació. Les dues variables s'extreuen dels resultats captats per MODIS i VIIRS.

L'extracció de la sèrie MODIS de la zona d'estudi es realitza a partir de l'ús del portal AppEEARS (Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples-NASA). En el nostre cas feim una extracció de dades des del 2011 al 2017 per l'incendi d'Andratx de la zona prèviament delimitada i del 2015 al 2022 pels incendis de Yeste i Grandas de Salime. Serà necessari incorporar en format comprimit els fitxers shapes de les zones afectades pels incendis que han estat digitalitzats anteriorment.

Anàlisi de l'evolució dels índexs NDVI i EVI

Els resultats obtinguts donen els valors NDVI i EVI de la sèrie temporal escollida. La sèrie MODIS seleccionada és de 250m i periodicitat 16 dies. El 250 m fa referència a la grandària de cada una de les quadrícules de les que obtindrem dades dintre del perímetre. Després de fer proves, es va escollir aquesta perquè té una major precisió i els resultats són més fiables enfront altres de 500 metres o d'1 kilòmetre; a més, en treballar amb àrees relativament petites segueix essent fàcil de manejar. Pel que fa a 16 dies, vol dir la freqüència en la qual obtenim valors, per tant, tindrem resultats cada 16 dies durant tot el que dura la sèrie temporal.

A més, AppEEARS també inclou una valoració de la qualitat de les dades obtingudes que serveix per a comprovar el grau de precisió que donen i expliquen si hi ha interferència de núvols, etc. Aquestes valoracions es poden consultar a l'annex d'aquest treball per cada una de les sèries temporals analitzades.

La sèrie obtinguda permet analitzar l'evolució de l'NDVI i l'EVI durant els anys desitjats i es pot comprovar si en efecte hi ha una pertorbació notable d'aquests valors que indiquin un canvi de la vegetació ocasionada per l'incendi i una posterior recuperació que permeti dur a terme la fase d'anàlisis de resultats (Pérez-Cabello et al., 2021).

En primer lloc s'ha calculat una recta de regressió lineal amb el programa Microsoft EXCEL de les sèries temporal d'índexs de vegetació com NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) i EVI (Enhanced Vegetation Index), la qual cosa ens permet analitzar l'evolució de la vegetació al llarg del temps.

L'equació de regressió té la forma $y = mx + b$, on "y" representa l'NDVI o l'EVI, "x" és el temps i "m" i "b" són els coeficients de la regressió.

La interpretació de l'equació de regressió lineal en aquest context seria la següent:

- La pendent (m) de l'equació indica la taxa de canvi mitjana de l'NDVI/EVI al llarg del temps. Si la pendent és positiva, significa que hi ha un augment mitjà de l'NDVI/EVI amb el temps, indicant un augment en la quantitat i la salut de la vegetació. Una pendent negativa indica una disminució mitjana de l'NDVI/EVI amb el temps, que pot ser indicatiu d'una deterioració de la vegetació.

- La intersecció amb l'eix y (b) indica el valor inicial de l'NDVI/EVI quan el temps és zero. Aquest valor inicial pot representar una línia de base o un nivell inicial de vegetació.

Amb l'equació de regressió lineal, es pot fer una estimació del valor de l'NDVI/EVI en un moment futur basant-se en el temps. Això permet analitzar l'evolució de la vegetació al llarg del temps, identificar tendències de creixement o deterioració i fer prediccions sobre l'estat de la vegetació en el futur.

En segon terme, s'ha aplicat el test de Mann Kendall on a través de la formulació d'una hipòtesi, depenent de si el valor de p-value és superior o no a un nombre es determina si hi ha una tendència en les dades. Els resultats, a més, tenen incorporada la mitjana en la qual es mouen els valors tant NDVI com EVI i la data de quan es van enregistrar.

Finalment amb la eina R Studio, un programari de desenvolupament integrat per al llenguatge R que s'utilitza per a la computació estadística i generació de gràfics, s'ha calculat la influència de l'estacionalitat en els resultats aplicant l'opció Decomposition a les sèries temporals de NDVI i EVI per a cada incendi. El procés ha estat el següent:

La primera passa és dividir les dades en períodes, en el nostre cas trimestres corresponents a les estacions climàtiques, calcular la influència del temps previ de l'estació per delimitar quin pes ha tingut la tendència del passat, tenint en compte les darreres 4 estacions. Fer un segon càlcul on només es tenen en compte els dos darrers resultats del càlcul anterior per obtenir una mitjana centrada i el càlcul de l'efecte estacional a partir d'agafar el resultat del trimestre seleccionat i dividir-ho pel resultat corresponent del trimestre de la mitjana centrada. Un cop tenim aquests resultats per a cada estació agafem els resultats de totes les estacions de la nostra sèrie i ens indica quina desviació de la mitjana presenten (Malak & Pausas, 2006).

A partir dels resultats obtinguts en tot aquest procés s'identifica quin ha estat l'efecte de l'incendi observant les dades. Com han anat variant els valors EVI-NDVI, l'evolució posterior als anys de l'incendi, si s'estabilitza aquest valor i retorna als nivells previs dels dos indicadors que utilitzem, tenint en compte les característiques climàtiques

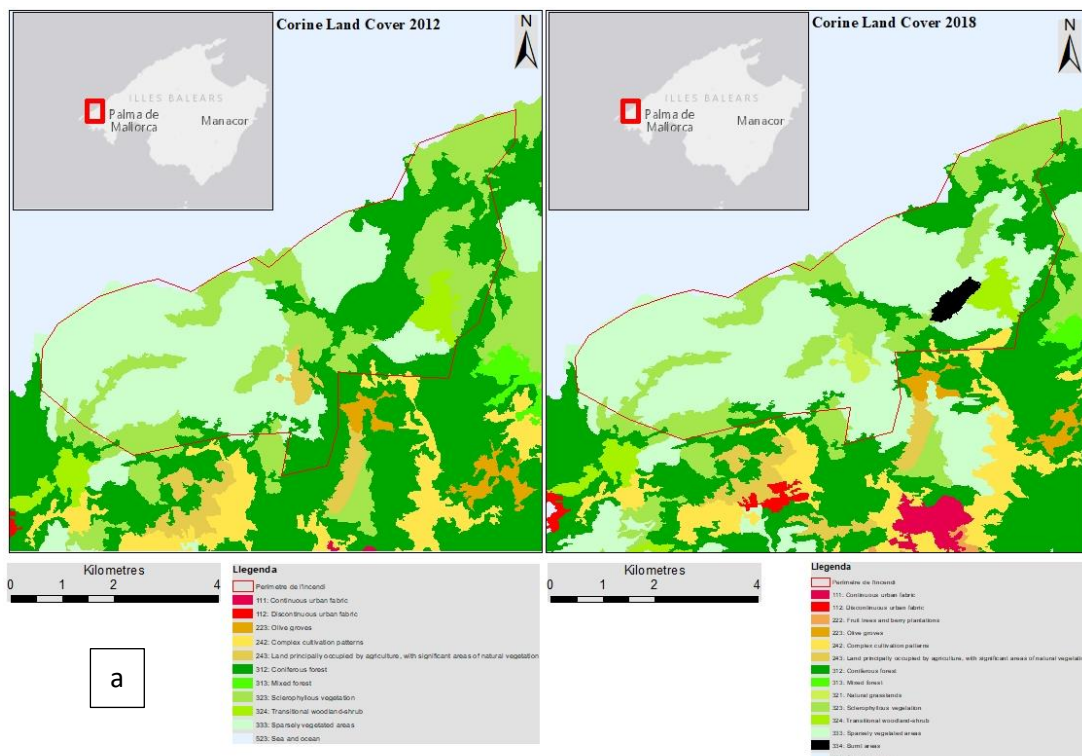
i estacionals del cas d'estudi o si per altra banda presenta una evolució diferent ja sigui regressiva, etc.

6. Resultats

En aquest apartat presentem els principals resultats per cada cas d'estudi.

6.1. Andratx

Els resultats de la Figura 5 indiquen que pel que fa a usos del sòl, les cobertures del sòl varen continuar molt semblants abans i posteriorment a l'incendi, amb l'excepció que trobem una disminució del pas del 2012 al 2018 de bosc continu 3% i vegetació esclerofil·la un 7%, mentre que augmenten en el 2018 les zones amb escassa vegetació 8% i apareix la zona cremada 3%.



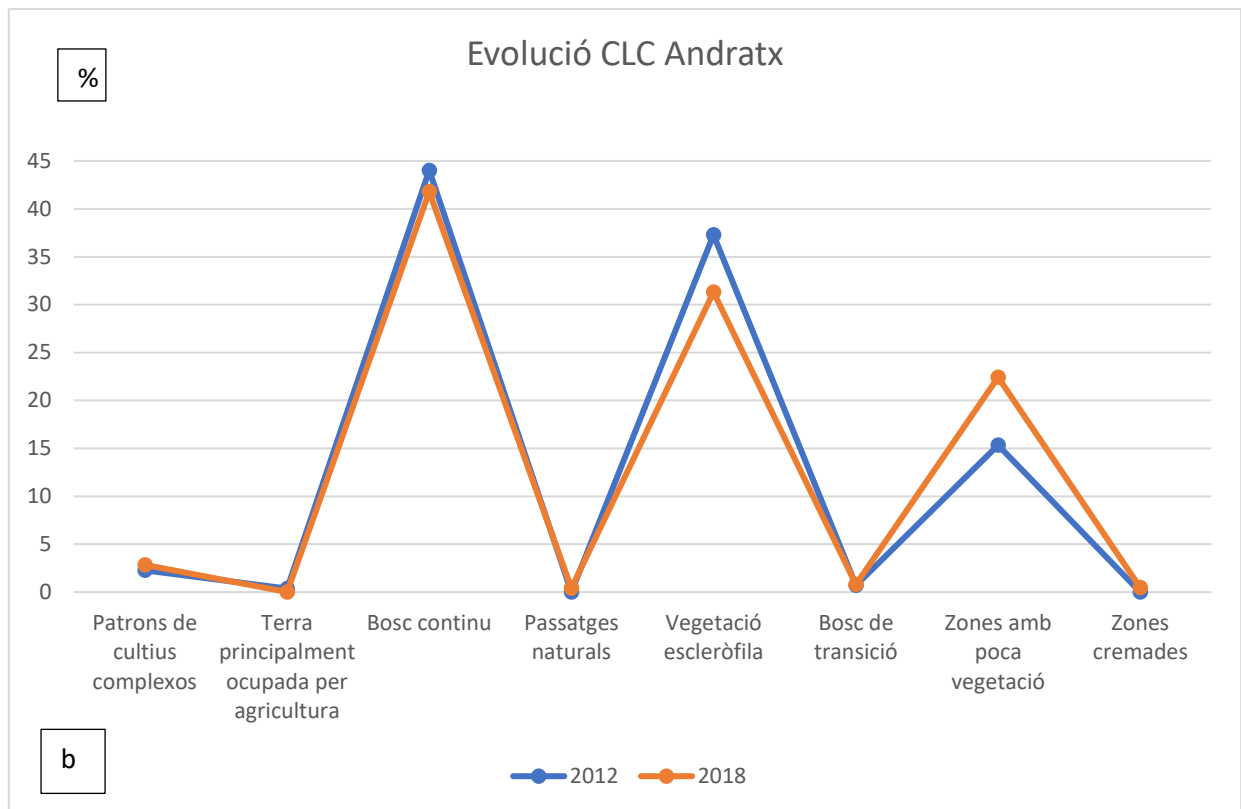


Figura 5 [a] Cartografia Corine Land Cover de l'incendi d'Andratx 2013. [b] Gràfic d'anàlisi comparat de % ocupació del sòl

Els resultats de l'evolució de l'índex EVI per l'incendi d'Andratx (Figura 6) indiquen una forta baixada, d'un 0'15 durant el temps on es va produir l'incendi, situant-se per sota del 0'14 EVI que indiquen una vegetació en mal estat. Durant els mesos posteriors es produeix una lenta recuperació, situant-se entorn del 0'23 que indica una vegetació dèbil, però que ja entraria dintre d'un nivell saludable; malgrat que no aconsegueix recuperar-se a bastament i l'estiu del 2014 torna a baixar per sota del 0'2 que indica el límit entre si la vegetació és o no saludable. A partir de la tardor del 2014, trobem una important recuperació d'0'1 punt i ja es situa per damunt del 0'3. Aquesta tendència de pujades a la tardor/hivern i baixades a la primavera/estiu es manté durant tota la sèrie. El nivell màxim s'assoleix la tardor del 2015, arribant al 0'34 i cal destacar l'estiu del 2016 en què quasi es torna a baixar sota el 0'2 saludable que indica EVI. A més d'això, s'ha de remarcar també la tendència positiva que dibuixa la línia de regressió que comença al 0'22 i al final ja està al 0'3.

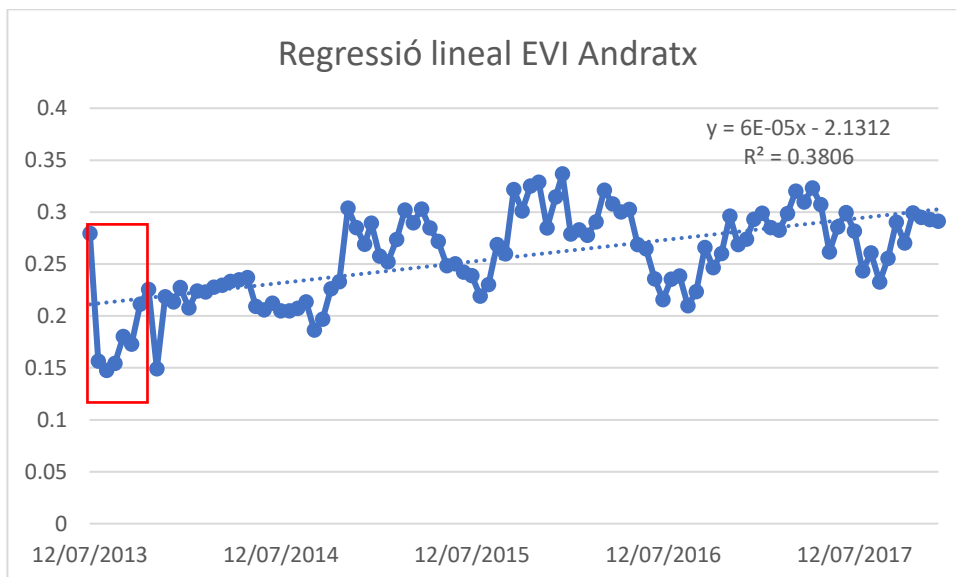


Figura 6 Evolució de l'Índex EVI de la zona cremada Andratx, 2011-2017

Els resultats de les dades NDVI Andratx (Taula 2) indiquen una baixada de 0'12 punts NDVI durant el període de l'incendi i s'arriba al mínim històric de la sèrie temporal situant-se en 0'27, que segons NDVI indica una vegetació en un estat no saludable ja que perquè es consideri com a tal ha de superar el 0'33. Durant la tardor del 2014 hi ha una recuperació de 0'13 punts i es torna a situar com als moments previs de l'incendi. El 2014 els valors tornen a situar-se entorn al 0'3 indicant vegetació en mal estat, però igual que en l'EVI comença una forta recuperació durant els mesos de tardor/hivern que arriben a estar en pujades d'entre 0'18 i 0'23, per tant, molt importants i també, per altra banda, les baixades en primavera/estiu són molt significatives, però ja no tornen a baixar per sota del 0'33. La tendència indica una progressió positiva una mica més pronunciada, començant a 0'37 i arribant a 0'49.

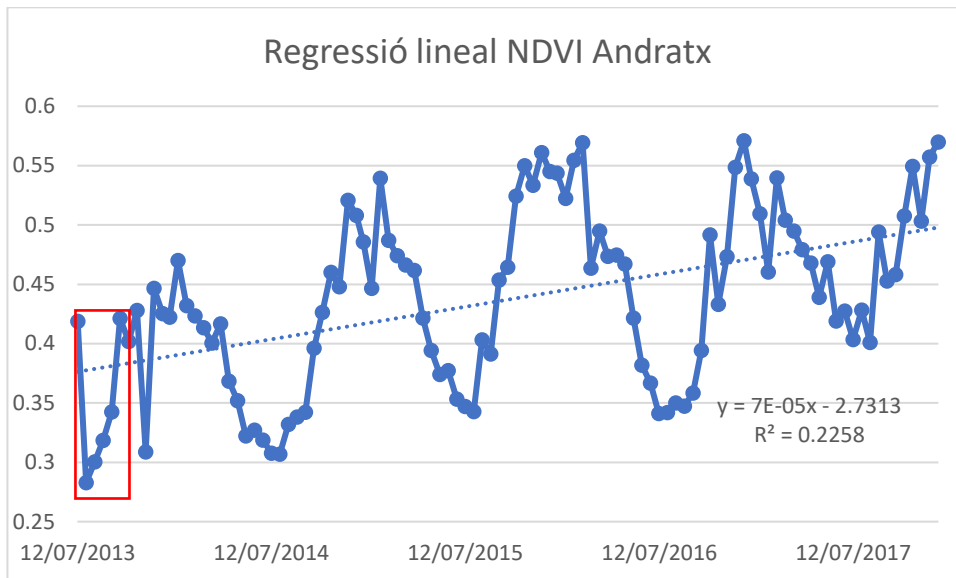


Figura 7 Evolució de l'índex NDVI de la zona cremada Andratx 2011-2017

Tenim, aleshores, els resultats dels dos models que indiquen una evolució força semblant entre els dos casos i es reafirmen l'un a l'altre. El test Mann Kendall (Taula 1^a i Taula 1b) ens indica en ambdós casos que si detecta una tendència, que com hem exposat és positiva.

Taula 1 Mann-Kendall Andratx

Taula 1 A Mann-Kendall Test EVI

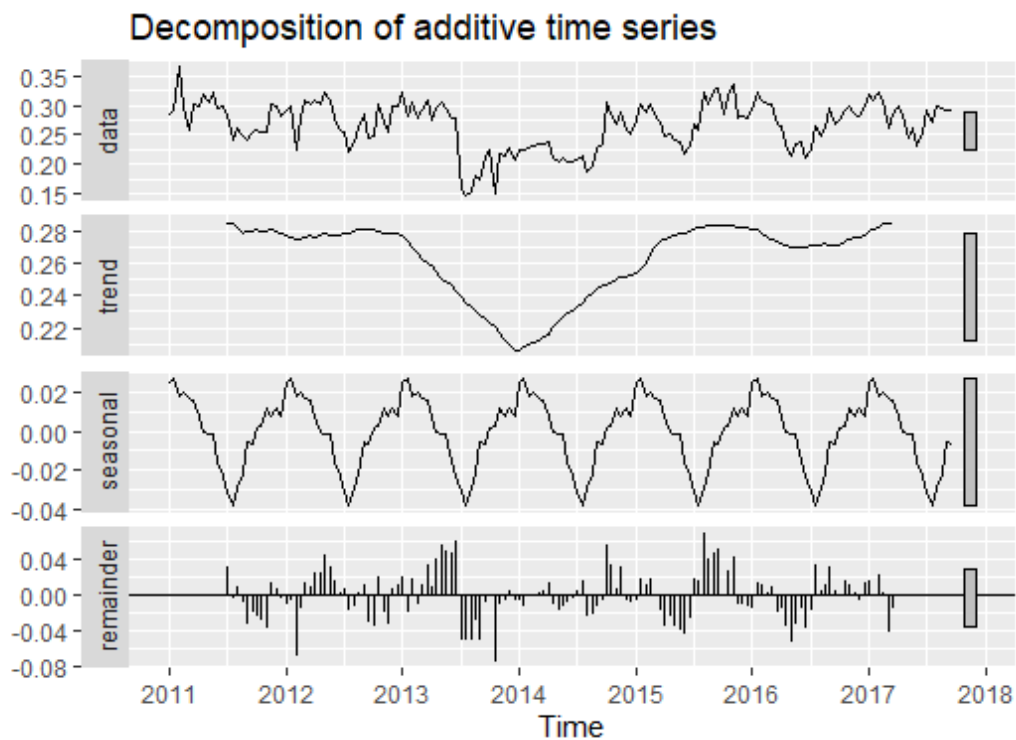
alpha	0,05
MK-stat	731
s.e.	130,3623156
z-stat	5,599777793
p-value	2,14627E-08
trend	yes

Taula 1 B Mann-Kendall Test NDVI

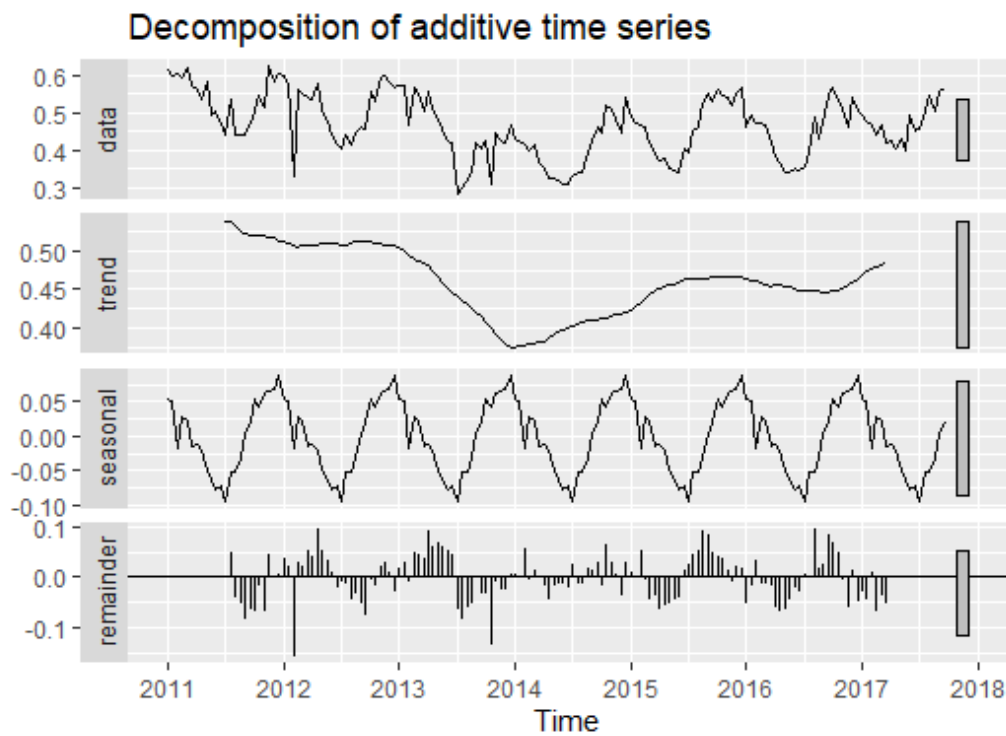
alpha	0,05
MK-stat	-952
s.e.	258,8603227
z-stat	-3,67379593
p-value	0,000238974
trend	yes

Tal i com podem veure al la figura 8 es pot observar una evolució molt semblant en les dues gràfiques en els mateixos mesos, EVI es troba entre 0'35 i 0'15 i NDVI entre 0'6 i 0'3. Pel que fa a la tendència també és molt semblant i coincideix la baixada amb l'incendi i l'any posterior i a partir d'aquell moment comença la pujada, es detecta però que en el cas de NDVI són més importants tant la baixada com la pujada. Pel que fa a l'estacionalitat captura perfectament les pujades de tardor/hivern i part de la primavera i la baixada quan arriba el final de la primavera i l'estiu, l'estacionalitat és molt important en els dos casos.

Es poden consultar les gràfiques de R Studio EVI i NDVI així com les d'estacionalitat a l'apartat de annex.



A



B

Figura 8 Resultats de Decomposition RStudio de EVI(a) i NDVI(b) Andratx

6.2. Yeste

Els resultats de la Figura 9 indiquen que pel que fa cobertures del sòl el paisatge va continuar força semblant abans i posteriorment a l'incendi. L'excepció és una disminució del pas del 2012 al 2018 de bosc de transició 3%, vegetació esclerofil·la un 8% i zones amb poca vegetació 6% i en canvi al 2018 la zona cremada augmenta un 18%.

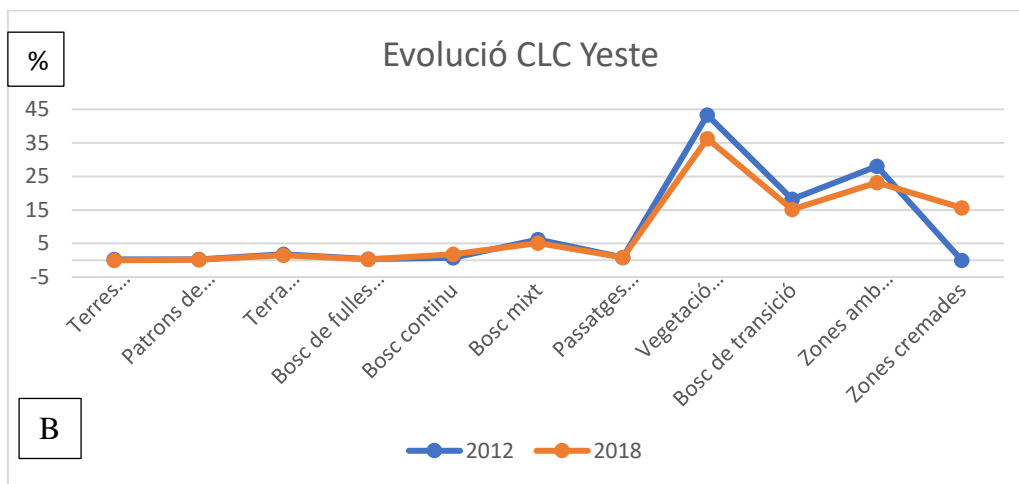
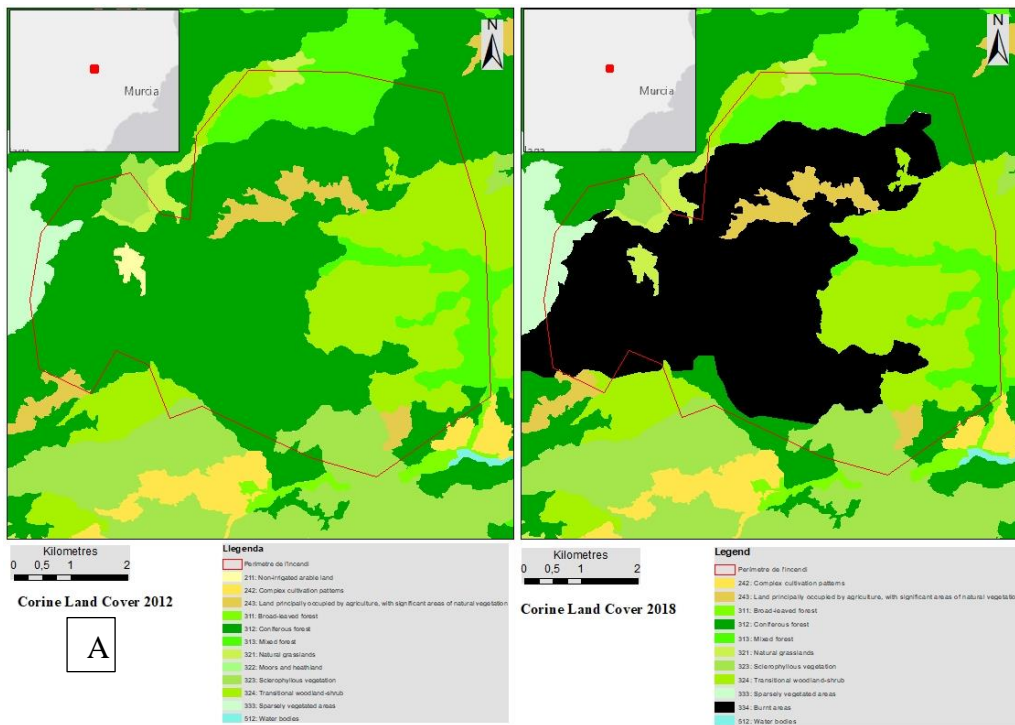


Figura 9 [a] Cartografia Corine Land Cover de l'incendi de Yeste 2017. [b] Gràfic d'anàlisi comparat de % ocupació del sòl

Els resultats de les dades EVI per Yeste, Figura 10 indiquen una forta baixada d'un 0'11 immediatament després de l'incendi, situant-se per sota del 0'19 EVI, que indiquen una vegetació en mal estat. Durant els mesos posteriors, es produeix una lenta recuperació, situant-se entorn al 0'23, que indica una vegetació dèbil però que ja entraria dintre d'un nivell saludable, tot i que no aconsegueix recuperar-se a bastament i durant el 2018 torna a baixar per sota del 0'2, que indica el límit entre si la vegetació és o no

saludable. A partir de la tardor 2018 i hivern 2019 trobem una recuperació de 0'07 punts i se situa per damunt del 0'25. Aquesta tendència de pujades a la tardor/hivern i baixades a la primavera/estiu es manté durant tota la sèrie, tot i que és suau. El nivell màxim s'assoleix l'hivern del 2020 arribant al 0'3 i cal destacar l'estiu del 2022, on quasi es torna a baixar sota el 0'2 saludable que indica EVI. A més d'això, cal remarcar també la tendència positiva que dibuixa la línia de regressió que comença al 0'23 i al final ja està quasi al 0'27, la progressió és lenta però va millorant.

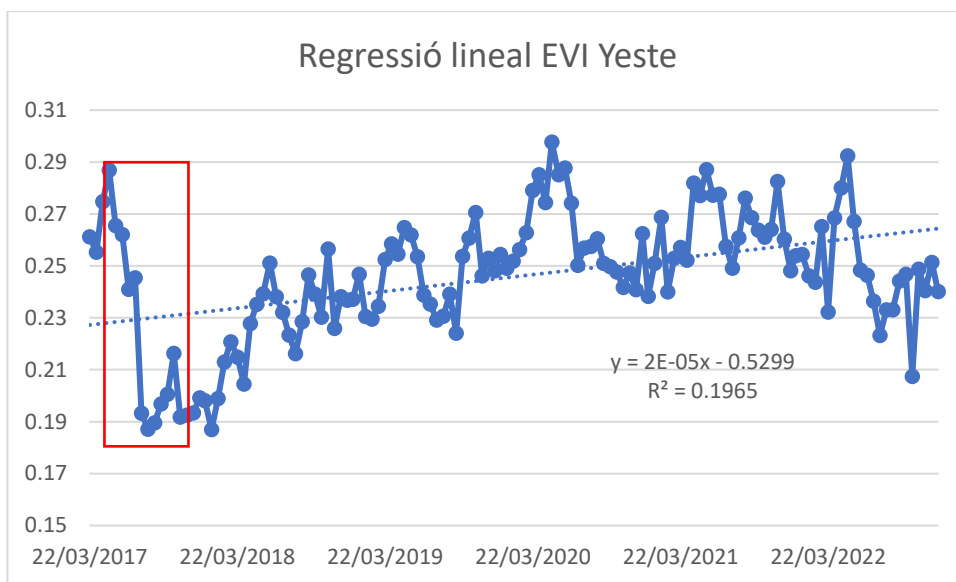


Figura 10 Evolució de l'índex EVI de l'incendi de Yeste, 2015-2022

Els resultats de les dades NDVI Yeste, Taula 5 indiquen una baixada de 0'17 punts NDVI durant el període de l'incendi i s'arriba al mínim històric de la sèrie temporal, situant-se en 0'35 que segons NDVI indica una vegetació en un estat no saludable, ja que perquè es consideri com a tal ha de superar el 0'33. Durant la tardor del 2017 hi ha una recuperació de 0'17 punts i es torna a situar com als moments previs de l'incendi. El 2018 els valors tornen a situar-se entorn al 0'4, indicant vegetació en mal estat però igual que en l'EVI comença una forta recuperació durant finals 2018 i principis del 2019, a l'hivern que arriben a estar en pujades de 0'2 punts són molt importants i també es baixades en primavera/estiu són grans de 0'1, però ja no tornen a baixar per sota del 0'33 a excepció de l'estiu del 2022 que l'EVI ja indicava que havia estat molt dur per la vegetació i en aquest cas s'arriba al 0'33 exacte. La tendència indica una progressió positiva més pronunciada, quasi del doble, començant a 0'45 i arribant a 0'52.

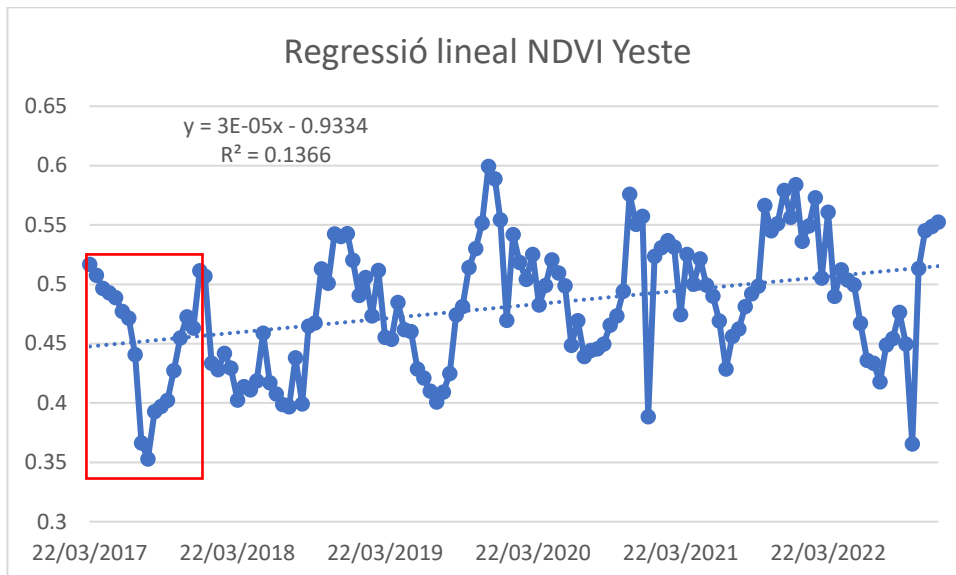


Figura 11 Evolució de l'índex NDVI de l'incendi de Yeste, 2015-2022

Trobem, per tant, una altra vegada, que els dos indicadors ensenyen el mateix, però en aquest cas la recuperació és més lenta i una mica més ràpida segons NDVI que segons EVI. Pel que fa al test Mann Kendall indica una tendència en ambdós casos (Taula 2a i Taula 2b).

Taula 2 Mann-Kendall Yeste

Taula 2 A Mann-Kendall Test EVI

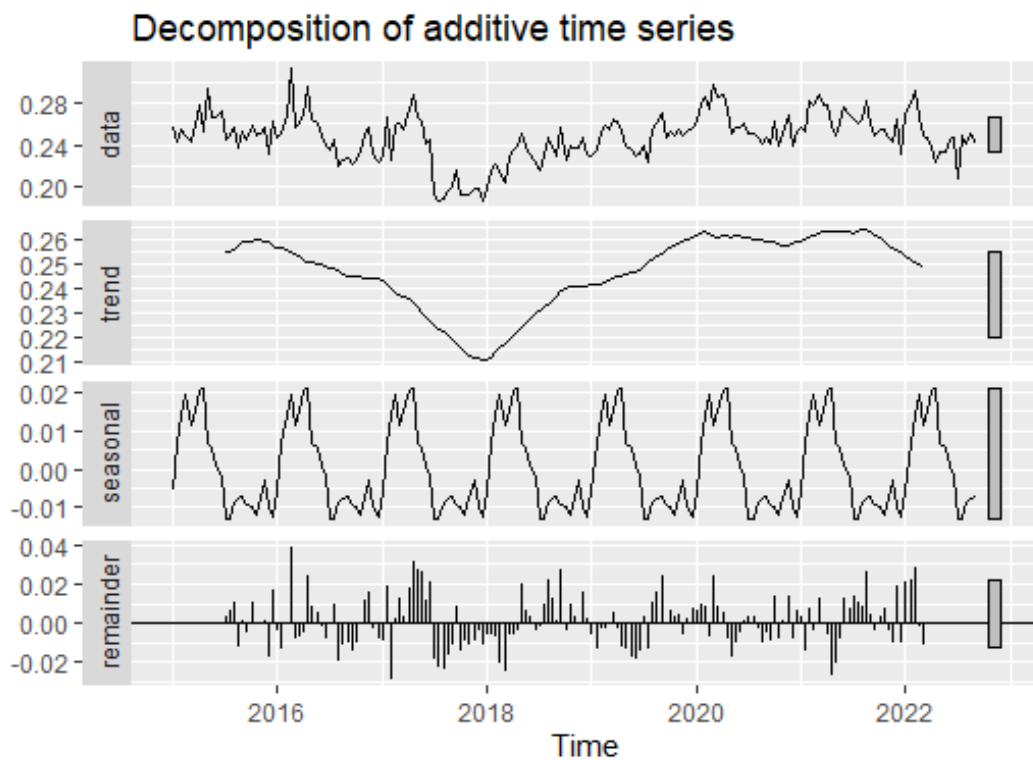
alpha	0,05
MK-stat	-756
s.e.	315,9324822
z-stat	-2,38975111
p-value	0,016859794
trend	yes

Taula 2B Mann-Kendall Test NDVI

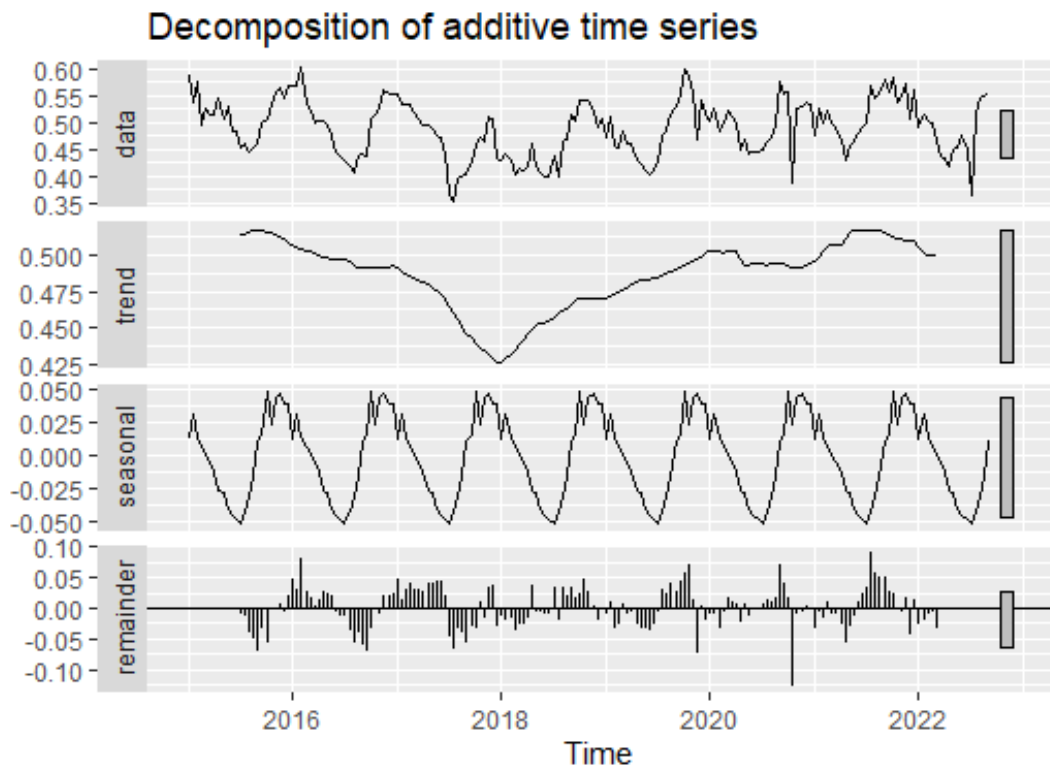
alpha	0,05
MK-stat	-1062
s.e.	315,9324822
z-stat	-3,358312487
p-value	0,000784199
trend	yes

Tal i com podem veure a la Figura 12a i 12b que representen la descomposició estacional de les sèries EVI-NDVI es pot observar una evolució molt semblant en les dues gràfiques en els mateixos mesos. L'índex EVI es troba entre 0'2 i 0'3 i NDVI entre 0'35 i 0'6. Pel que fa a la tendència, també és molt semblant i coincideix la baixada amb l'incendi i l'any posterior i a partir d'aquell moment comença la pujada, es detecta però una vegada més que en el cas de NDVI són més importants tant la baixada com la pujada. Pel que fa a l'estacionalitat, sí que trobem importants diferències l'EVI presenta un hivern i primavera molt alts, mentre que l'estiu i la tardor són estacions baixes; NDVI presenta una estacionalitat més mediterrània on l'estiu és el mes baix i la resta d'estacions són alcistes. L'estacionalitat és suau per EVI mentre que és molt important en NDVI.

Es poden consultar les gràfiques de R Studio EVI i NDVI així com les d'estacionalitat a l'apartat de annex.



A



B

Figura 12 Resultats de Decomposition RStudio de EVI (a) i NDVI (b) Yeste

6.3. Grandas de Salime

Els resultats de la Figura 13 indiquen que pel que fa a usos del sòl el paisatge va continuar semblant abans i posteriorment a l'incendi. Tot continua igual de fet, a excepció d'una disminució del pas del 2012 al 2018 de bosc de fulles amples 10% i bosc de transició 12% i en canvi al 2018 el bosc continu 17% i les terres cultivables no regades 6%. Per tant, trobam una fluctuació entre els diferents tipus de bosc.

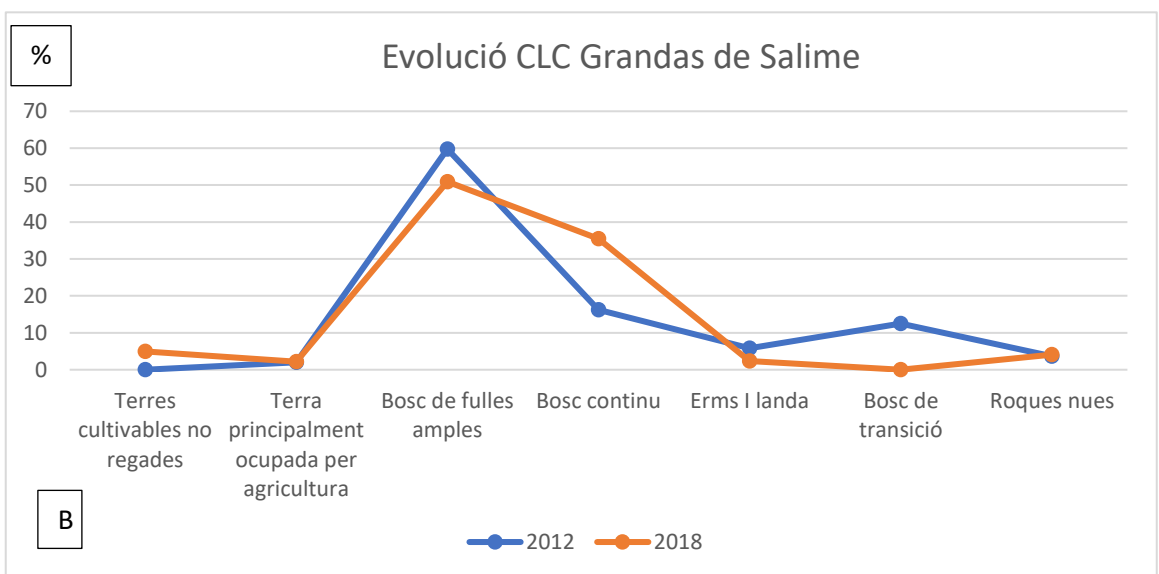
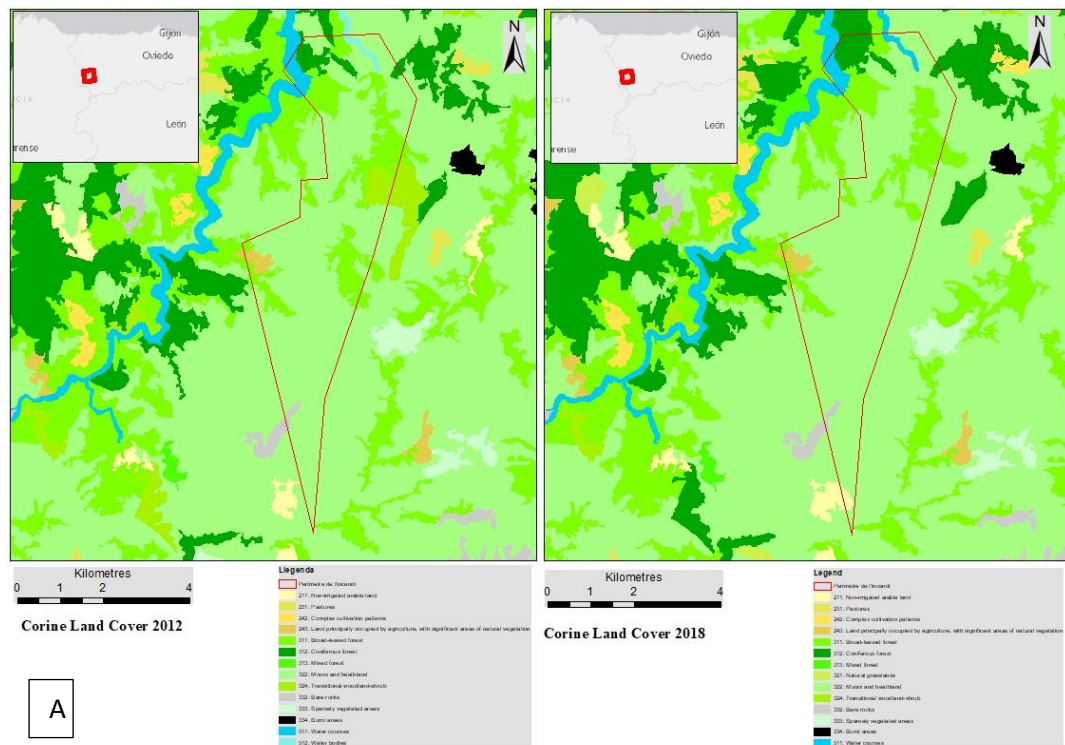


Figura 13 [a] Cartografia Corine Land Cover de l'incendi de Grandas de Salime 2017. [b] Gràfic d'anàlisi comparat de % ocupació del sòl

Els resultats de les dades EVI de Grandas de Salime, Figura 14 indiquen una forta baixada d'un 0'2 durant el temps on es va produir l'incendi situant-se per sota del 0'1 EVI que indiquen una vegetació en mal estat. Durant els mesos posteriors es produeix una lenta recuperació situant-se entorn al 0'3 que indica una vegetació dèbil però que ja entraria dintre d'un nivell saludable però no aconsegueix recuperar-se abastament i durant

el 2018 torna a baixar per sota del 0'2 que indica el límit entre si la vegetació és o no saludable, arribant al 0'15. A partir de la tardor 2018 i hivern 2019 trobem una recuperació de 0'22 punts i es situa per damunt del 0'37. Aquesta tendència de pujades a la tardor, hivern i baixades a la primavera, estiu es manté durant tota la sèrie tot i és força important. El nivell màxim s'assoleix l'hivern del 2020 arribant quasi al 0'4 i destacar l'estiu del 2020 on torna a baixar sota el 0'2 saludable que indica EVI igualant el mínim del 2017 de 0'1. A més d'això, cal remarcar també la tendència positiva que dibuixa la Línia de regressió que comença al 0'23 i al final ja esta al 0'3, la progressió torna a ser lenta però millora poc a poc.

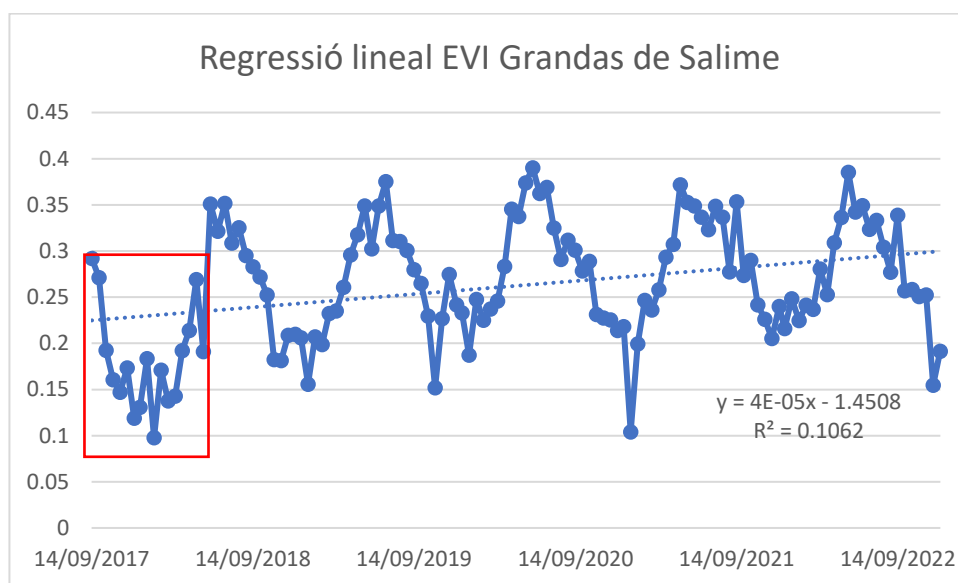


Figura 14 Evolució de l'index EVI de l'incendi de Grandas de Salime, 2015-2022

Els resultats de les dades NDVI de Grandas de Salime, Figura 15 indiquen una baixada de 0'45 punts NDVI durant el període de l'incendi i s'arriba a un mínim de 0'20 que segons NDVI indica una vegetació en un estat no saludable ja que perquè es consideri com a tal ha de superar el 0'33. Durant la tardor del 2017 hi ha una molt ràpida recuperació de 0'4 punts i és torna a situar com als moments previs de l'incendi. El 2018 els valors es mantenen força estables durant el llarg de l'any i se situen entorn del 0'65, indicant vegetació en bon estat però presenta importants caigudes els mesos d'estiu arribant a un mínim de la sèrie temporal de 0'17 durant el 2020. Durant la resta de l'any els valors es mantenen estables pel que resta de sèrie temporal. Destacar les fortes baixades molt puntuals que no acaben d'encaixar amb la resta de la sèrie. La tendència

indica una progressió positiva més pronunciada, quasi del doble, començant a 0'55 i arribant entorn al 0'70.

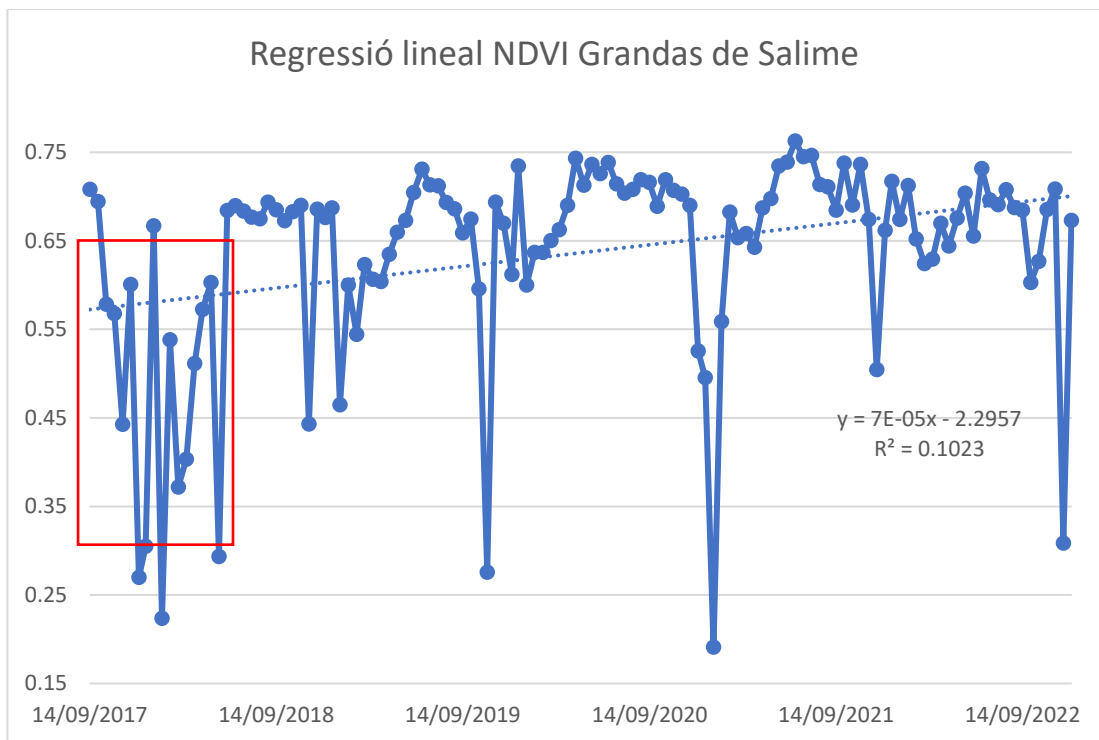


Figura 15 Índex NDVI de l'incendi de Grandas de Salime, 2015-2022

Per primer cop trobem un cas on EVI i NDVI tenen tendència positiva a les taules, es repeteix que NDVI sigui més ràpid que EVI, però aquest pic el test de Mann Kendall no detecta una tendència per a EVI però sí per a NDVI (taules 3a i 3b)

Taula 3 Mann-Kendall Grandas de Salime

Taula 3A Mann-Kendall Test EVI

alpha	0,05
MK-stat	-86
s.e.	315,9324822
z-stat	-0,269044827
p-value	0,787895187
trend	no

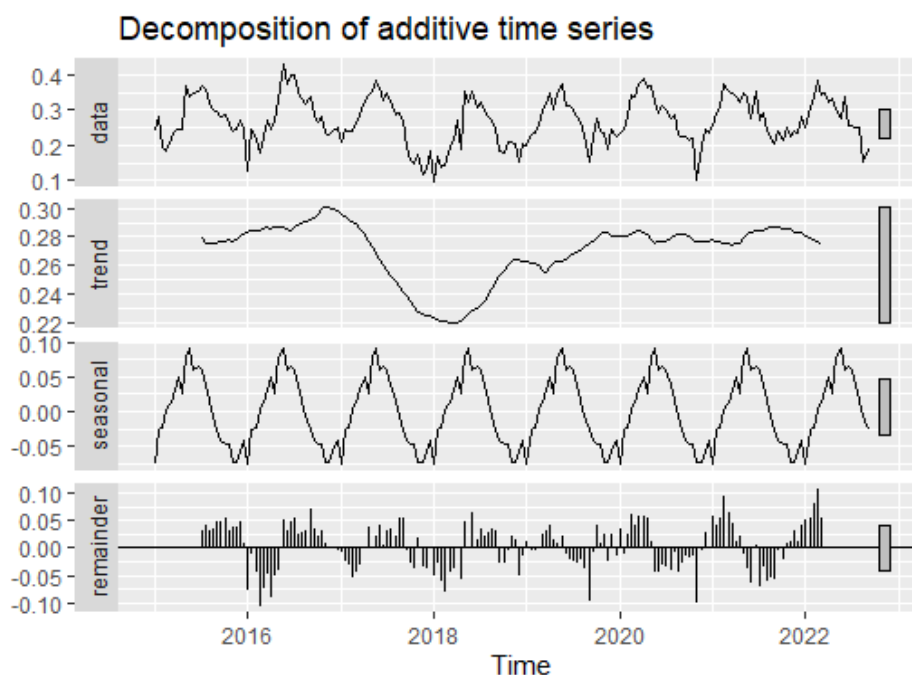
Taula 3B Mann-Kendall Test NDVI

alpha	0,05
-------	------

MK-stat	-668
s.e.	315,9324822
z-stat	-2,111210583
p-value	0,034754216
trend	yes

Tal i com podem veure al en la gràfica de descomposició estacional EVI-NDVI de Grandas de Salime, Figura 16 es pot observar una evolució que no assimila gaire entre ambdós casos però sí que s'ajusta al que hem vist a les taules anterior. EVI es troba entre 0'1 i 0'4 mentre que NDVI està entre 0'2 i 0'6. Pel que fa a la tendència és molt semblant i coincideix la baixada amb l'incendi i l'any posterior que hem observat en tots els casos i a partir d'aquell moment inicia una pujada. Es repeteix la tendència una vegada més que en el cas de NDVI són més importants les pujades i baixades que en EVI que són més suaus. Pel que fa a l'estacionalitat sí que trobem importants diferències l'EVI presenta un hivern però sobretot la primavera molt alts, mentre que l'estiu i a destacar la tardor són estacions baixes mentre que NDVI presenta una estacionalitat més equilibrada al llarg de l'any on la tardor és l'estació de l'any més baixa. L'estacionalitat és suau tant per EVI com per NDVI i no hi ha desequilibris molt grans en tot l'any. És poden consultar les gràfiques de R Studio EVI i NDVI així com les d'estacionalitat a l'apartat de annex.

A



B

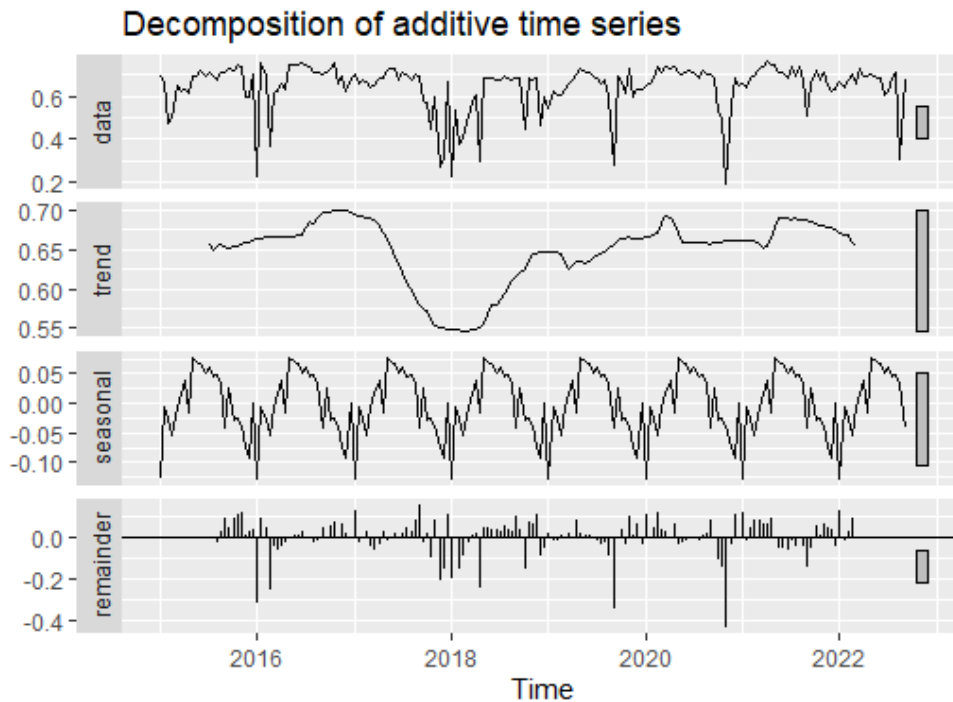


Figura 16 Resultats de Decomposition RStudio de EVI a i NDVI b Grandas de Salime

7. Discussió

La localització de les tres àrees analitzades permet il·lustrar com es recupera la vegetació en cada una de les principals zones climàtiques de la península Ibèrica. En primer lloc, un exemple de clima mediterrani del llevant peninsular com és el cas d'Andratx; en segon lloc, una localització de la Meseta Central amb unes condicions més àrides i continentals, o almenys amb menor influència marítima i, en darrer cas, una localització de la costa Atlàntica. En tots els casos hi ha condicionants que poden propiciar l'aparició d'incendis principalment pot ser per causa humana però també ambiental: aquests factors que es poden aplicar als tres casos són períodes d'altres temperatures i temporada de sequera, que augmenten el perill i faciliten la propagació o la presència d'importants masses forestals que serveixin de combustible per al foc (Ubeda Cartaña et al., 2021). Alguns d'aquests condicionants es poden tenir en compte a l'hora d'interpretar i intentar explicar l'evolució que observem de la vegetació a partir de les dades, altres serveixen per donar un context a la situació o causa de l'inici del foc i seran més o menys importants depenent del cas.

Els resultats obtinguts per FIRMS capten adequadament els llocs on hi ha hagut aquestes anomalies tèrmiques, que en el nostre cas representen incendis. Però cal dir també, que hi ha una divergència entre les imatges obtingudes i els resultats EVI-NDVI i la representació que té l'incendi observant els usos del sòl (Tentor et al., 2015). Això pot ser a causa de molts motius. Un d'ells és que entre que es produeix l'incendi i es crea la capa CLC, passa un període de temps que en dos casos en només d'un any, però en l'altre és de cinc i, per tant, en la nova assignació d'usos del sòl una part de l'àrea afectada ja s'ha recuperat i torna a ser de coberta vegetal o altres usos. De totes maneres, a través de la imatge obtinguda es pot identificar correctament el lloc on hi ha hagut la zona afectada ja que s'ha produït un canvi en el paisatge.

A través de l'Arc MAP, es pot delimitar amb molta precisió l'àrea que es vol analitzar i per tant, els resultats són de gran qualitat, ja que permeten obtenir posteriorment les dades d'exactament la zona d'estudi i no inclou altres àrees que no hagin estat afectades pel foc i que, per tant, per a aquest estudi no interessin i només aportarien soroll a l'anàlisi. Així, la delimitació de l'incendi entre la imatge FIRMS per detectar la zona i l'opció extra de l'Arc MAP per delimitar a través del CLC donen un gran resultat per extreure una zona on aplicar els càlculs i poder dur a terme l'anàlisi. En els tres casos s'ha aconseguit una zona que permet realitzar i obtenir els resultats desitjats posteriorment.

Amb la delimitació que hem obtingut de la zona afectada per l'incendi, podem aplicar satisfactòriament l'índex EVI i NDVI, a més de fer la comparació CLC, el qual ha estat un element molt important a destacar el procés al que s'han sotmeses les dades i que han generat la regressió lineal i la descomposició de la sèrie temporal (Forkel et al., 2013).

En el cas Andratx, el que mostren els indicadors és una cobertura vegetal en un estat precari, que és vulnerable davant els incendis i la recuperació de la qual és lenta. Presenta una estacionalitat important, que pel cas d'estudi és destacable que en l'estiu és quan pitjors valors hi ha respecte la salut de la vegetació. També cal dir que els dos indicadors mostren un patró semblant en els fets més destacables. Pel que fa a CLC, cal destacar la pèrdua vegetació esclerofíl·la i, en menor part, de bosc continu per zones de poca vegetació i zones cremades, conseqüència directe del pas del foc.

Pel que fa al segon cas, a Yeste, els resultats dibuixen un estat de la vegetació una mica millor que el cas d'Andratx. Hi ha la tendència a mantenir-se amb una recuperació ràpida, l'incendi presenta un impacte negatiu molt rellevant que deteriora notablement l'estat de salut de la vegetació, segons els dos indicadors que també en aquest cas coincideixen en presentar uns mateixos resultats. Referent a l'estacionalitat i la importància que té, en aquest cas sobretot, destacar en els mesos d'estiu quan baixen el valor dels índexs de salut de la vegetació notablement. Respecte a CLC, en aquest cas, destacar la pèrdua de vegetació escleròfila, bosc de transició i zones amb poca vegetació que ara passen a ser zones cremades a la zona on l'incendi va afectar més, en aquest cas el CLC és molt revelador del canvi d'usos del sòl.

En darrer cas, a Grandas de Salime, hi ha una gran diferència respecte als resultats de les altres dues localitzacions i és que no hi ha una coincidència entre EVI i NDVI. S'observa que la valoració de l'estat de conservació de la vegetació segons EVI és baixa, mentre que segons NDVI és un estat molt bo i estable, tot i que les dades presenten unes baixades sobtades en algunes dades. A més que l'EVI presenta una estacionalitat marcada semblant a la que podem trobar en el cas de Yeste, coincidint en el fet que hi ha tres estacions força semblants i llavors tenim el cas de l'estiu on baixen els valors, però amb la diferència que aquí el contrast entre estacions és molt més suau. Pel que fa a NDVI, per altra banda, no indica una estacionalitat pronunciada entre les estacions. Sí que hi ha casos en el que coincideixen EVI i NDVI, com en el fet que trobem una tendència positiva, una molt ràpida recuperació de la vegetació en uns pocs mesos i uns efectes generats per l'incendi menys destructors que en els altres dos casos (Escuin et al., 2008). En aquest cas, el CLC confirma aquesta teoria ja que així com en els altres casos hi havia un canvi de zones amb vegetació per l'aparició d'unes altres on eres de poca vegetació o cremades directament, aquí trobem un intercanvi entre bosc de fulles amples i de transició per un augment del bosc continu però ni hi apareixen zones que indiquen clarament efectes de l'incendi.

Tot aquest procés s'ha pogut dur a terme sense complicacions i sense obtenir errors en l'obtenció de les dades ni com a resultats de les anàlisis resultants, per tant, i a més, es pot comprovar que les dades obtingudes són versemblants. Per a futurs treballs es poden afegir més zones per tal d'ampliar el ventall de casos per poder comparar posteriorment, així com es podrien incloure mesuraments de les variables externes que han pogut influir

en la generació causa de l'incendi o la seva recuperació: com pot ser el mesurament de la temperatura durant la sèrie temporal analitzada o la precipitació d'igual forma. És d'igual interès incloure en un futur quina és la tipologia exacta de la vegetació tant abans de l'incendi com després, per tal de poder aconseguir informació sobre quin tipus resisteix millor el foc i quina es recupera més aviat i més òptima, per tant, per la reforestació.

8. Conclusions

La primera conclusió és metodològica que prova l'eficàcia de la metodologia utilitzada per la detecció dels perímetres dels incendis forestals i l'impacte sobre la vegetació. En els tres casos analitzats d'Andratx, Yeste i Grandas de Salime, través de l'anàlisi de l'evolució dels índex EVI i NDVI, els resultats permeten observar el moment precís en el qual es produeix l'incendi, així com l'evolució de la vegetació durant la sèrie temporal analitzada. Aquest procés també permet determinar l'estat de la vegetació i veure si el seu estat és saludable o no, per tant es resol positivament l'objectiu principal de si és possible identificar el pas de l'incendi i veure els efectes sobre la coberta vegetal, així com determinar si aquesta s'ha o no recuperat del dany causat pel foc.

La font d'informació FIRMS-NASA s'ha demostrat adequat per determinar el lloc on hi ha hagut anomalies tèrmiques i, per tant, també els incendis, la delimitació dels incendis per part d'aquesta eina, però és poc precisa, abasta una àrea de terreny massa àmplia. Per tant, també es resol positivament l'objectiu secundari de delimitar l'àrea afectada per l'incendi en els tres casos ha estat possible.

Amb l'ús de la capa CLC, que té una capacitat limitada per delimitar adequadament la zona afectada per les flames per si sola, és necessari l'ajuda de la delimitació del MODIS i VIIRS de l'incendi, que sí que tenen una major precisió per obtenir l'àrea. Creant un format Shapefile i l'eina Clip que permet retallar la informació només pel diàmetre, es pot llavors aplicar dintre d'aquest perímetre el CLC i veure com ha evolucionat l'ús del sòl abans i després de l'incendi.

Amb les dades del portal AppEEARS, que donen els índexs de qualitat de vegetació EVI i NVDI, no han pogut resoldre el darrer dels objectius secundaris de determinar la importància de l'estacionalitat i el clima per si sols, però aplicant la descomposició estacional amb R Studio que utilitza com a base aquestes dades EVI

NDVI sí que es pot extreure quin és el pes i influència que tenen l'estacionalitat del clima sobre els indicadors; per tant, també s'ha pogut resoldre positivament aquest objectiu.

Els resultats del cas d'Andratx indiquen que l'impacte del foc ha estat important sobre la vegetació, la tendència és positiva a futur, el que indica que tot i el dany rebut la vegetació es recupera. L'estacionalitat és un factor a tenir en compte quan analitzem les dades en aquest cas, i que en general a la zona de la coberta vegetal no presenta uns valors que indiquen una vegetació de la zona exuberant, més aviat una vegetació adaptada al clima amb sequeres a l'estiu i un tipus de vegetació que es troba dintre del medi on pot desenvolupar-se. Però el fort impacte de l'incendi fan que sigui una àrea vulnerable davant el foc i cal extremar precaucions, de moment, però com hem comentat l'anàlisi indica que sí que hi ha hagut una recuperació positiva de la vegetació després de l'incendi, per tant sembla que progressa adequadament. Cal fer un incís en aquest cas i destacar el paper que juga la vegetació mediterrània, que en alguns casos ja sigui com el pi blanc amb la capacitat de dispersió de les seves llavors, utilitza aquest mecanisme del foc per rejuvenir l'ecosistema, ja que amb aquest procés s'elimina el bosc de planifolis vell i hi ha l'oportunitat de brollar nous exemplars (Ugarte et al., 2021).

Les dades obtingudes del cas de Yeste ens mostren que l'impacte del foc no ha estat molt perjudicial per a la vegetació de la zona i la tendència total és negativa, però la posterior a l'incendi és positiva: està en un pitjor estat que abans de l'incendi, però sembla que si ampliem la mostra temporal, dintre d'uns quants més aquests valors ja s'igualaran o inclús milloraran. Els indicadors mostren una vegetació estable que no es veu molt afectada per l'estacionalitat i tolera bé l'escassetat d'aigua, adaptada al medi, igual que en el cas d'Andratx, però els seus valors tant en EVI com NDVI no serien d'una vegetació en un molt bon estat sinó una vegetació estabilitzada. És a dir, no indiquen una vegetació molt saludable, però almenys estan estable dintre dels seus valors, e per un altre clima podrien indicar una salut dolenta. Segons l'anàlisi, sí que es pot afirmar que hi ha hagut una recuperació de la cobertura vegetal posterior a l'incendi analitzant les dades.

Per acabar en el cas de Grandas de Salime, els resultats indiquen que l'impacte del foc no ha estat molt perjudicial per a la vegetació, la seva tendència és molt positiva, la que més de les tres mostres. El que es pot explicar amb el clima d'on s'extreuen, un clima atlàntic amb molta més precipitació i una vegetació més exuberant, així com també és el

cas que presenta una millor salut de la vegetació. Destacar que hi ha diferències entre les mostres d'EVI on presenta una menor estacionalitat i una menor qualitat de l'estat de la vegetació i NDVI amb major estacionalitat sobretot per l'efecte de l'estiu i un nivell de salut molt alt, acostant-se quasi a l'1 el que indica una vegetació més frondosa. Segons l'anàlisi sí que es pot afirmar que hi ha hagut una ràpida recuperació de la cobertura vegetal posterior a l'incendi d'acord amb les dades observades.

Per tant, la conclusió definitiva és que s'accepta la hipòtesi de partida sobre la influència climàtica en la recuperació de la vegetació post incendi i es constata la viabilitat tècnica d'analitzar l'efecte de l'incendi i la recuperació de la vegetació, a partir de l'anàlisi dels valors EVI i NDVI de les zones cremades. Això implica que la metodologia proposada pot ser una eina útil per a donar suport a les tasques de restauració forestal, ja que aporta un indicador de quines zones s'han recuperat millor i, per tant, és menys prioritari dur a terme accions i també pel contrari detectar zones on la vegetació s'hagi vist molt afectada i en aquests llocs intensificar les tasques de recuperació. Així, utilitzant aquest procediment es pot fer una catalogació dintre dels espais afectats per a incendis forestals i saber on actuar més ràpidament.

9. Referències bibliogràfiques

- About FIRMS / Earthdata. (s.d.). Recuperat 6 maig 2023, de <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/find-data/near-real-time/firms/about-firms>
- Aemet, I. (2011). Atlas climático ibérico/Iberian climate atlas. En *Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino*.
- Alonso-Betanzos, A., Fontenla-Romero, O., Guijarro-Berdiñas, B., Hernández-Pereira, E., Paz Andrade, M. I., Jiménez, E., Soto, J. L. L., & Carballas, T. (2003). An intelligent system for forest fire risk prediction and fire fighting management in Galicia. *Expert Systems with Applications*, 25(4). [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(03\)00095-2](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(03)00095-2)
- Bernard Ginard, J. L. (2017). *Monitorización de la regeneración vegetal postincendio a partir de imágenes Landsat OLI 8: el caso del incendio de Andratx de 2013*. <http://dspace.uib.es/xmlui/handle/11201/2175>
- Bodi, M. B., Cerddà, A., Mataix-Solera, J., & Doerr, S. H. (2012). Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: Revisión bibliográfica. En *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* (Número 58). <https://doi.org/10.21138/bage.2058>
- Buma, B. (2012). Evaluating the utility and seasonality of NDVI values for assessing post-disturbance recovery in a subalpine forest. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2228-y>
- Caon, L., Vallejo, V. R., Coen, R. J., & Geissen, V. (2014). Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. En *Earth-Science Reviews* (Vol. 139). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.09.001>
- Capador Aguilar, Y. E., González Angarita, G. P., & Suarez Daza, P. A. (2021). Análisis de la cobertura vegetal en incendios forestales mediante índices espectrales: caso de estudio Cerros Orientales (Bogotá, Colombia). *Avances Investigación en Ingeniería*, 18(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.6931>
- Carriquí, M., Nadal, M. (2019). La regeneració post-incendi de la comunitat vegetal: el cas d'Andratx. Conselleria de Medi Ambient, Agricultura i Pesca (Ed.) *Gestió Ambiental post-incendi forestall. Monitoratge i control de processos ecogeomorfològics amb technologies de precisió*. (Pag. 97-110)
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yerba, M., Nieto, H., Martín, P., Vilar, L., Martínez, J., Padrón, D., Martín, S., & Salas, J. (2007). Generación de un Modelo de Peligro de Incendios Forestales mediante Teledetección y SIG. *Teledetección: Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*, April 2016.
- Costa, M. B., De Menezes, L. F. T., & Nascimento, M. T. (2017). Post-fire regeneration in seasonally dry tropical forest fragments in southeastern Brazil. *Anais da*

Academia Brasileira de Ciências, 89(4). <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720160728>

- Davies, D. K., Ilavajhala, S., Wong, M. M., & Justice, C. O. (2009). Fire information for resource management system: Archiving and distributing MODIS active fire data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2002076>
- El fuego arrasó 12.825 hectáreas | El Comercio: Diario de Asturias*. (s.d.). Recuperat 13 maig 2023, de <https://www.elcomercio.es/asturias/fuego-arraso-12825-20171026000617-ntvo.html>
- Escuin, S., Navarro, R., & Fernández, P. (2008). Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4). <https://doi.org/10.1080/01431160701281072>
- Eugenio, F. C., dos Santos, A. R., Fiedler, N. C., Ribeiro, G. A., da Silva, A. G., dos Santos, Á. B., Paneto, G. G., & Schettino, V. R. (2016). Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil. *Journal of Environmental Management*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.021>
- Extinguido el incendio de Yeste tras calcinar unas 3.000 hectáreas - RTVE.es*. (s.d.). Recuperat 13 maig 2023, de <https://www.rtve.es/noticias/20170809/extinguido-incendio-yeste-tras-calcinar-mas-3000-hectareas/1595541.shtml>
- Fiore, N. M., Goulden, M. L., Czimczik, C. I., Pedron, S. A., & Tayo, M. A. (2020). Do recent NDVI trends demonstrate boreal forest decline in Alaska? *Environmental Research Letters*, 15(9). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9c4c>
- Forkel, M., Carvalhais, N., Verbesselt, J., Mahecha, M. D., Neigh, C. S. R., & Reichstein, M. (2013). Trend Change detection in NDVI time series: Effects of inter-annual variability and methodology. *Remote Sensing*, 5(5). <https://doi.org/10.3390/rs5052113>
- Gemitzi, A., & Koutsias, N. (2022). A Google Earth Engine code to estimate properties of vegetation phenology in fire affected areas – A case study in North Evia wildfire event on August 2021. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100720>
- João, T., João, G., Bruno, M., & João, H. (2018). Indicator-based assessment of post-fire recovery dynamics using satellite NDVI time-series. *Ecological Indicators*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.008>
- 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. En *Reviews of Geophysics* (Vol. 60, Número 3). <https://doi.org/10.1029/2020RG000726>

- Kumar, L., & Mutanga, O. (2018). Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential. *Remote Sensing*, *10*(10). <https://doi.org/10.3390/rs10101509>
- Lacouture, D. L., Broadbent, E. N., & Crandall, R. M. (2020). Detecting vegetation recovery after fire in a fire-frequented habitat using normalized difference vegetation index (Ndvi). *Forests*, *11*(7). <https://doi.org/10.3390/F11070749>
- Ma, W., Feng, Z., Cheng, Z., Chen, S., & Wang, F. (2020). Identifying forest fire driving factors and related impacts in china using random forest algorithm. *Forests*, *11*(5). <https://doi.org/10.3390/F11050507>
- Malak, D. A., & Pausas, J. G. (2006). Fire regime and post-fire Normalized Difference Vegetation Index changes in the eastern Iberian peninsula (Mediterranean basin). *International Journal of Wildland Fire*, *15*(3). <https://doi.org/10.1071/WF05052>
- Novo, A., Fariñas-álvarez, N., Martínez-Sánchez, J., González-Jorge, H., Fernández-Alonso, J. M., & Lorenzo, H. (2020). Mapping forest fire risk—a case study in Galicia (Spain). *Remote Sensing*, *12*(22). <https://doi.org/10.3390/rs12223705>
- Pérez-Cabello, F., Montorio, R., & Alves, D. B. (2021). Remote sensing techniques to assess post-fire vegetation recovery. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, *21*, 100251. <https://doi.org/10.1016/J.COESH.2021.100251>
- Pettorelli, N. (2013). The Normalized Difference Vegetation Index. En *The Normalized Difference Vegetation Index*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:osobl/9780199693160.001.0001>
- Tentor, F. R., Zamboni, L. P., Sione, W. F., Maldonado, F. D., & Aceñolaza, P. G. (2015). INCENDIOS EN EL COMPLEJO LITORAL DEL RÍO PARANÁ (2010-2013) A TRAVÉS DE FOCOS DE CALOR (FC FIRMS). *JORNADAS ARGENTINAS DE GEOTECNOLOGÍAS*, *1*.
- Ubeda Cartaña, X., Mataix-Solera, J., Francos, M., & Farguell, J. (2021). *Grandes incendios forestales en España y alteraciones de su régimen en las últimas décadas*. https://doi.org/10.34037/978-989-9053-06-9_1.2_11
- Ugarte, R. M., García, M. M. R., & Sánchez-Mata, D. (2021). Evaluating the post-fire natural regeneration of Mediterranean-type scrublands in Central Spain. *Mediterranean Botany*, *42*. <https://doi.org/10.5209/MBOT.67331>
- Van Leeuwen, W. J. D. (2008). Monitoring the effects of forest restoration treatments on post-fire vegetation recovery with MODIS multitemporal data. *Sensors*, *8*(3). <https://doi.org/10.3390/s8032017>

10. Annex

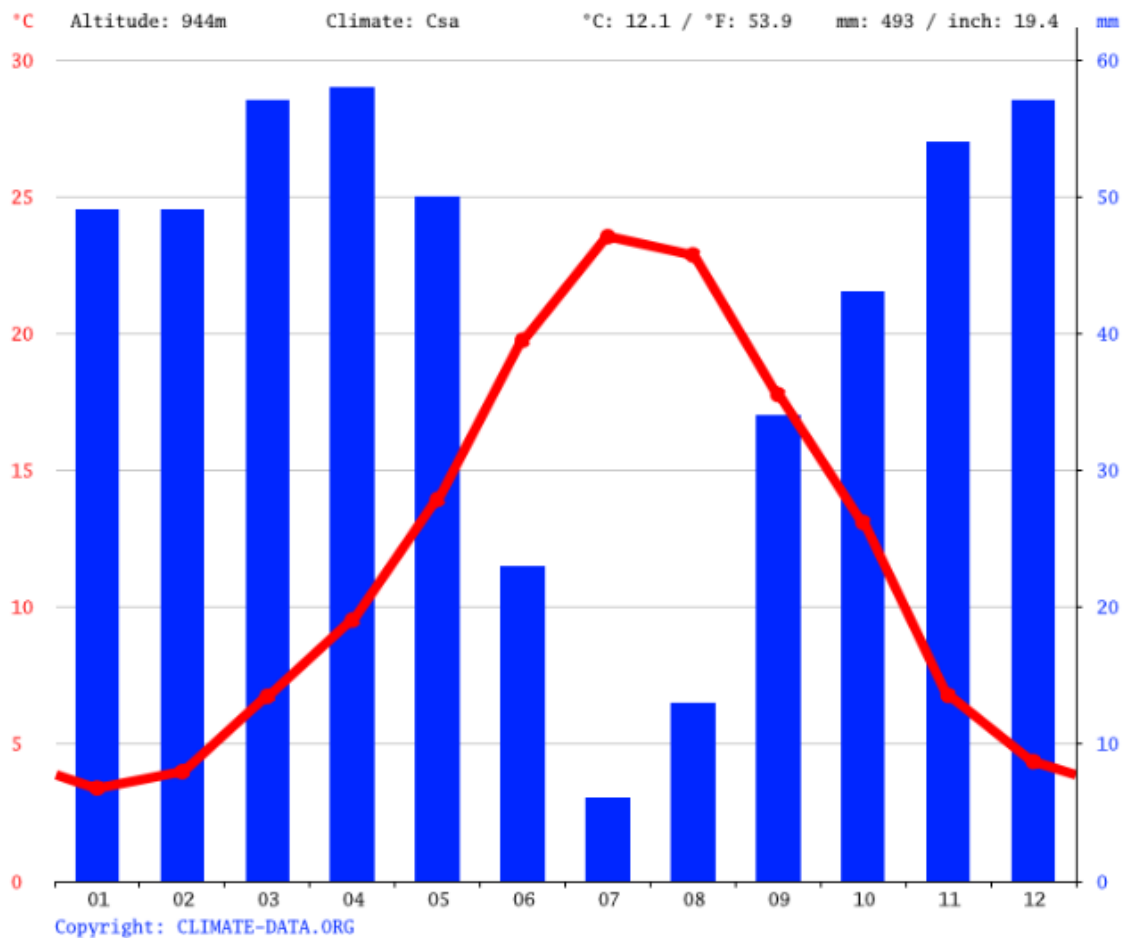


Figura 17 Climograma Andratx entre els anys 1999-2019

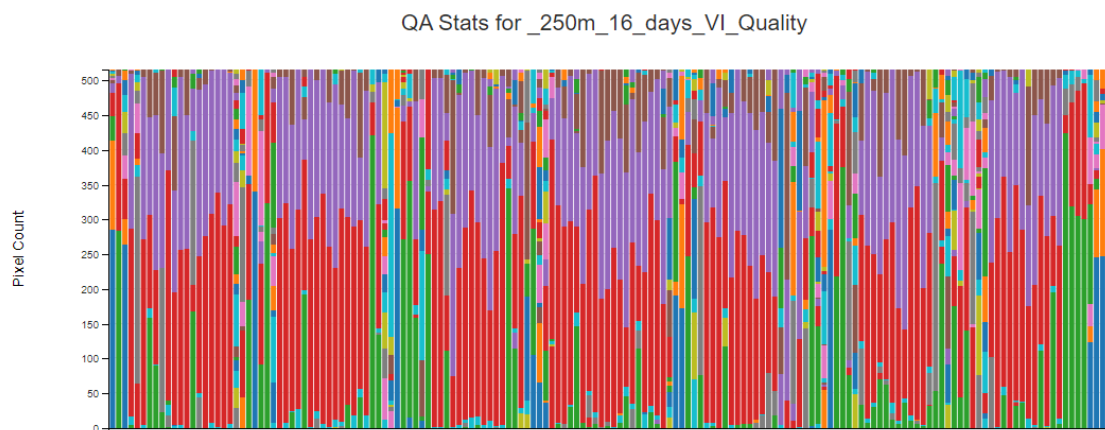


Figura 18 Qualitat dels resultats obtinguts del cas Andratx, AppEEARS

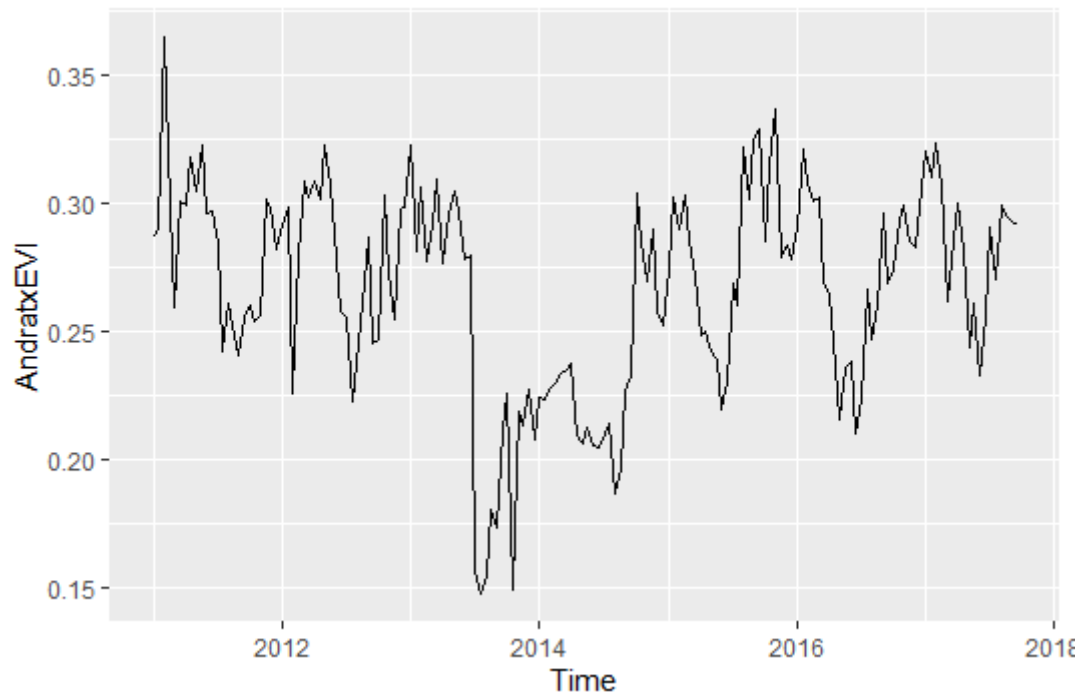


Figura 19 Anàlisis de la tendència de EVI del cas Andratx, 2011-2017

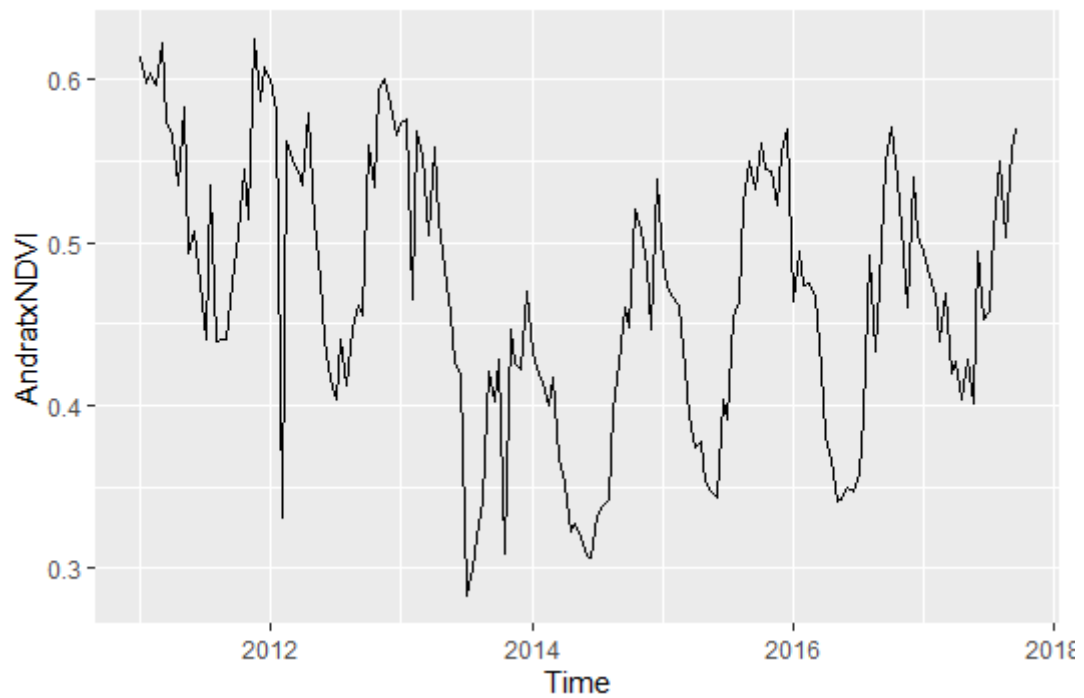


Figura 20 Tendència NDVI Andratx, 2011-2017

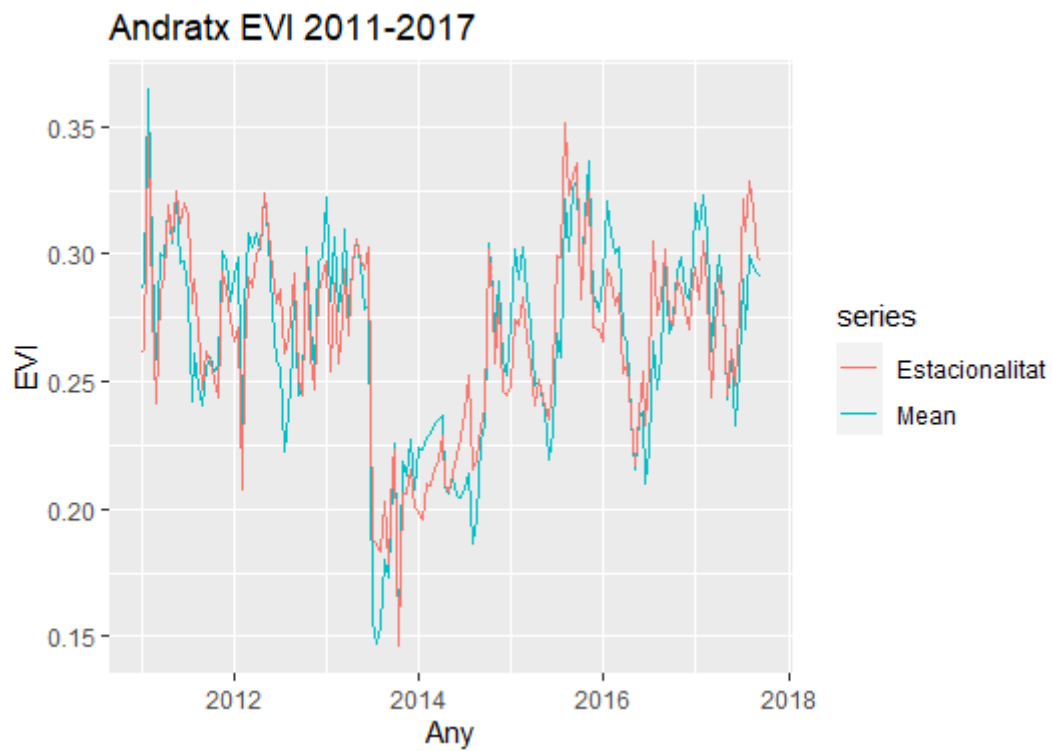


Figura 21 Índex d'estacionalitat de l'EVI del cas Andratx, 2011-2017

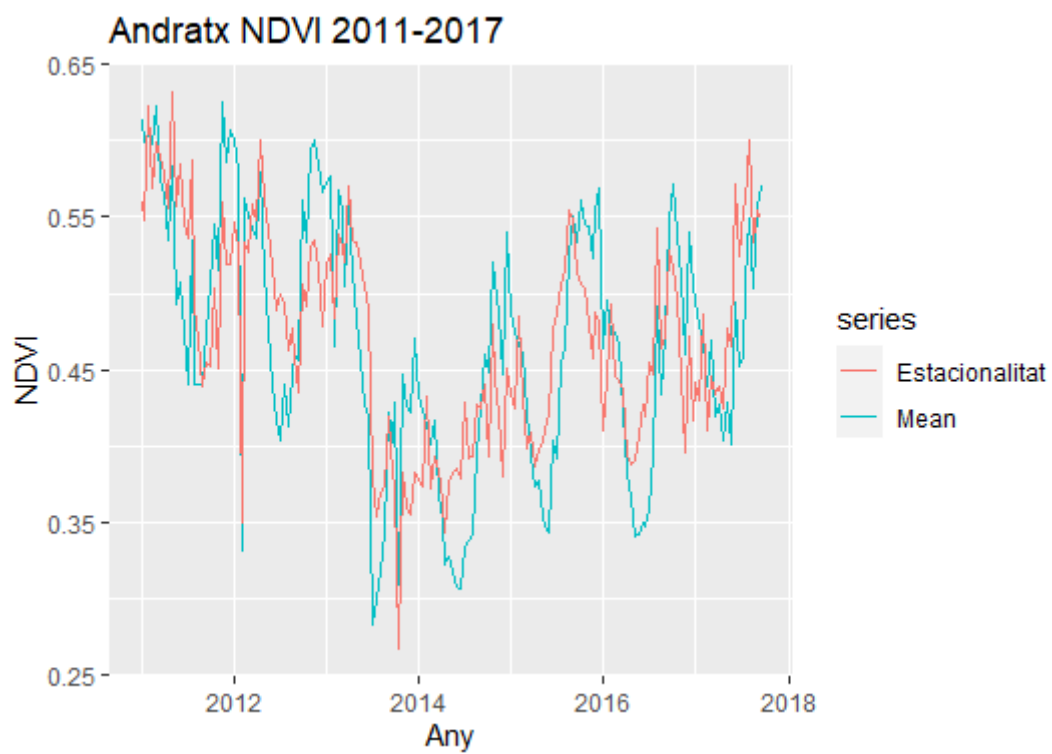


Figura 22 Índex d'estacionalitat Andratx NDVI, 2011-2017

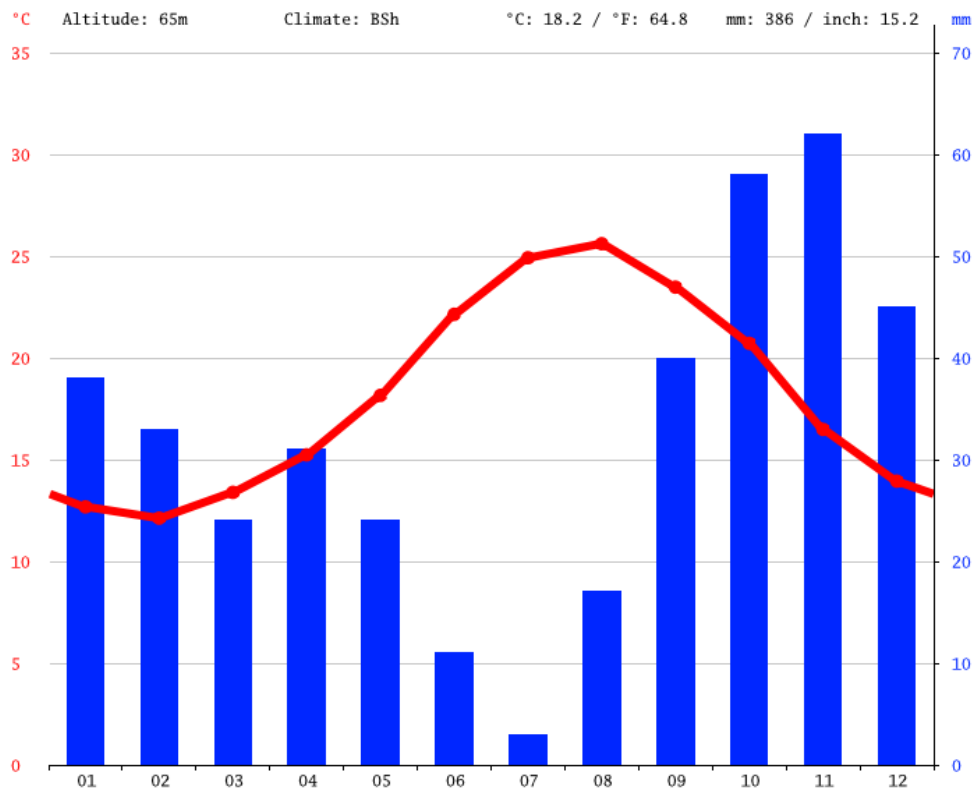


Figura 23 Climograma Yeste entre els anys 1999-2019

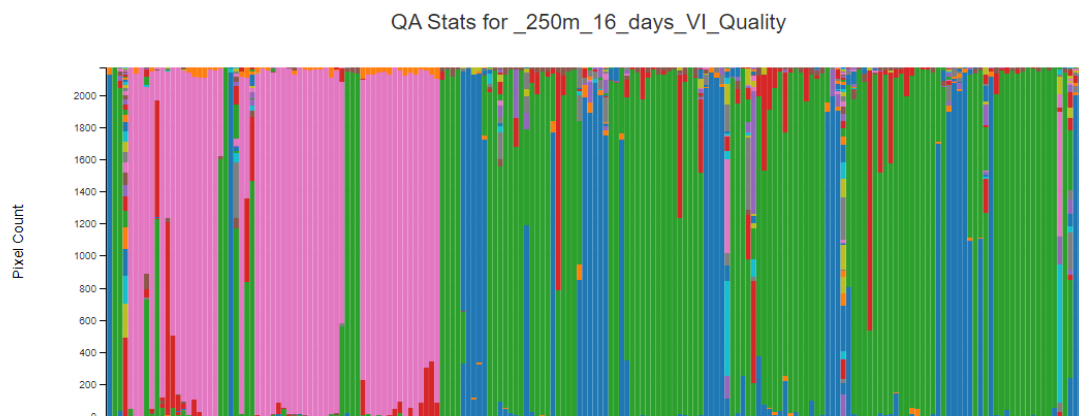


Figura 24 Qualitat dels resultats obtinguts del cas de Yeste, 2015-2022

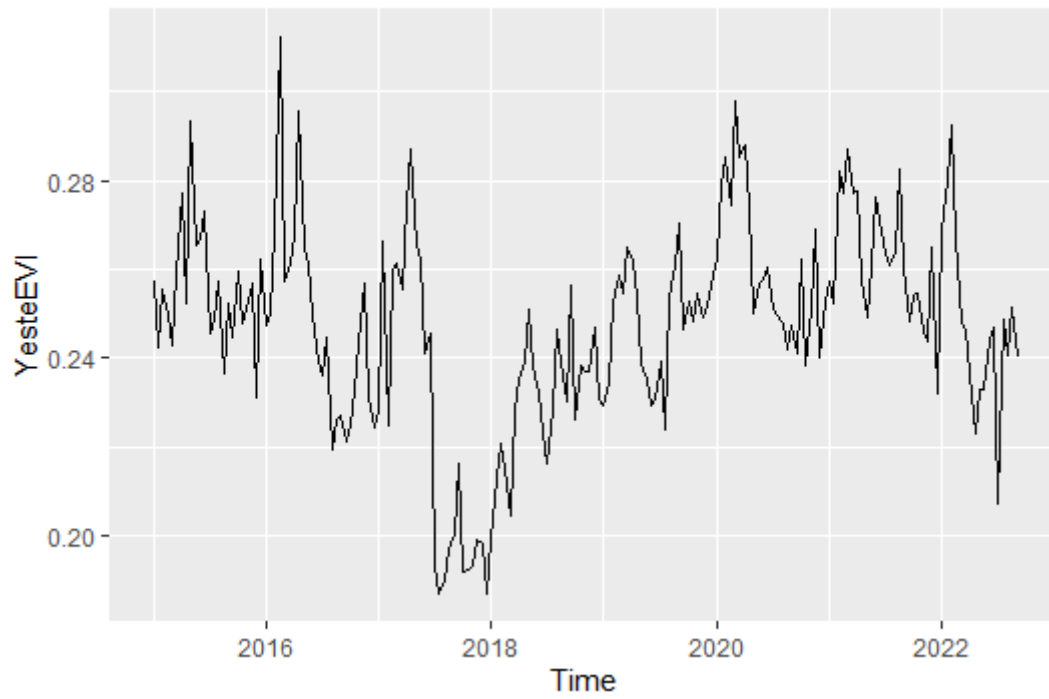


Figura 25 Tendència EVI Yeste, 2015-2022

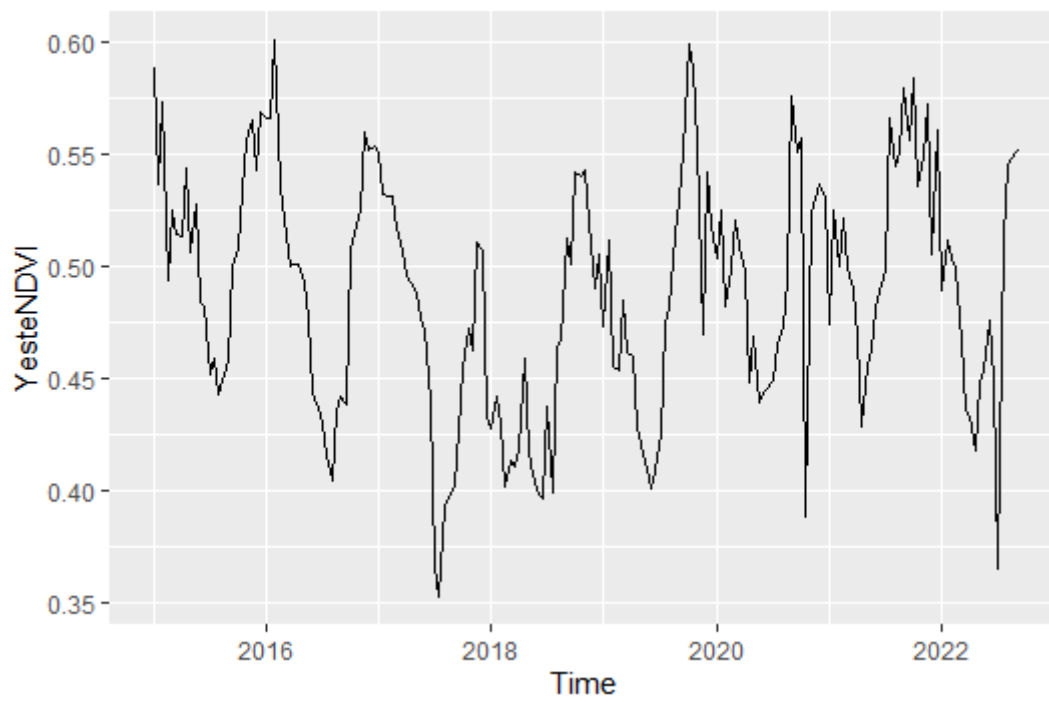


Figura 26 Tendència NDVI Yeste, 2015-2022

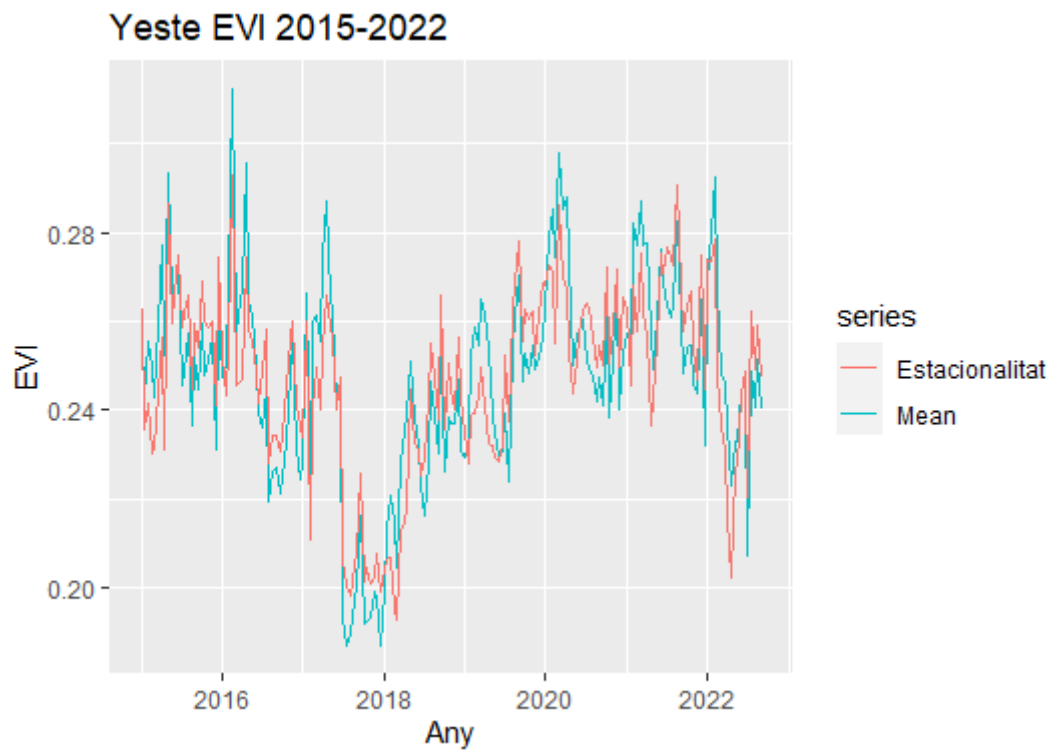


Figura 27 Índex d'estacionalitat de l'EVI del cas de Yeste, 2015-2022

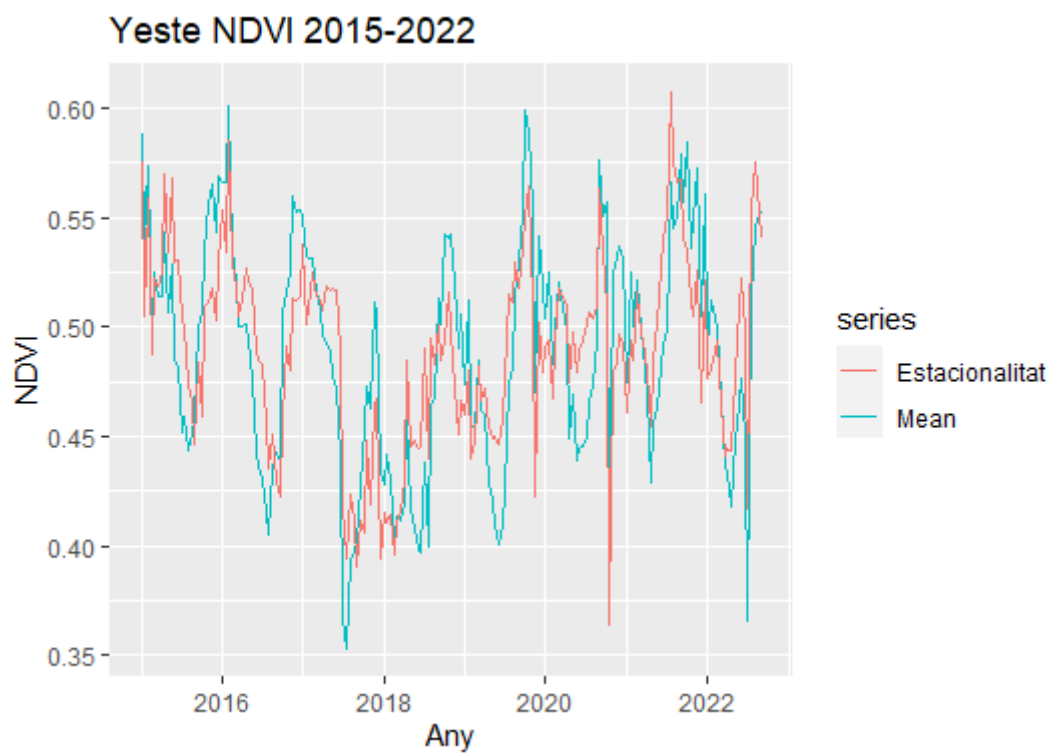


Figura 28 Índex d'estacionalitat de l'NDVI del cas de Yeste, 2015-2022

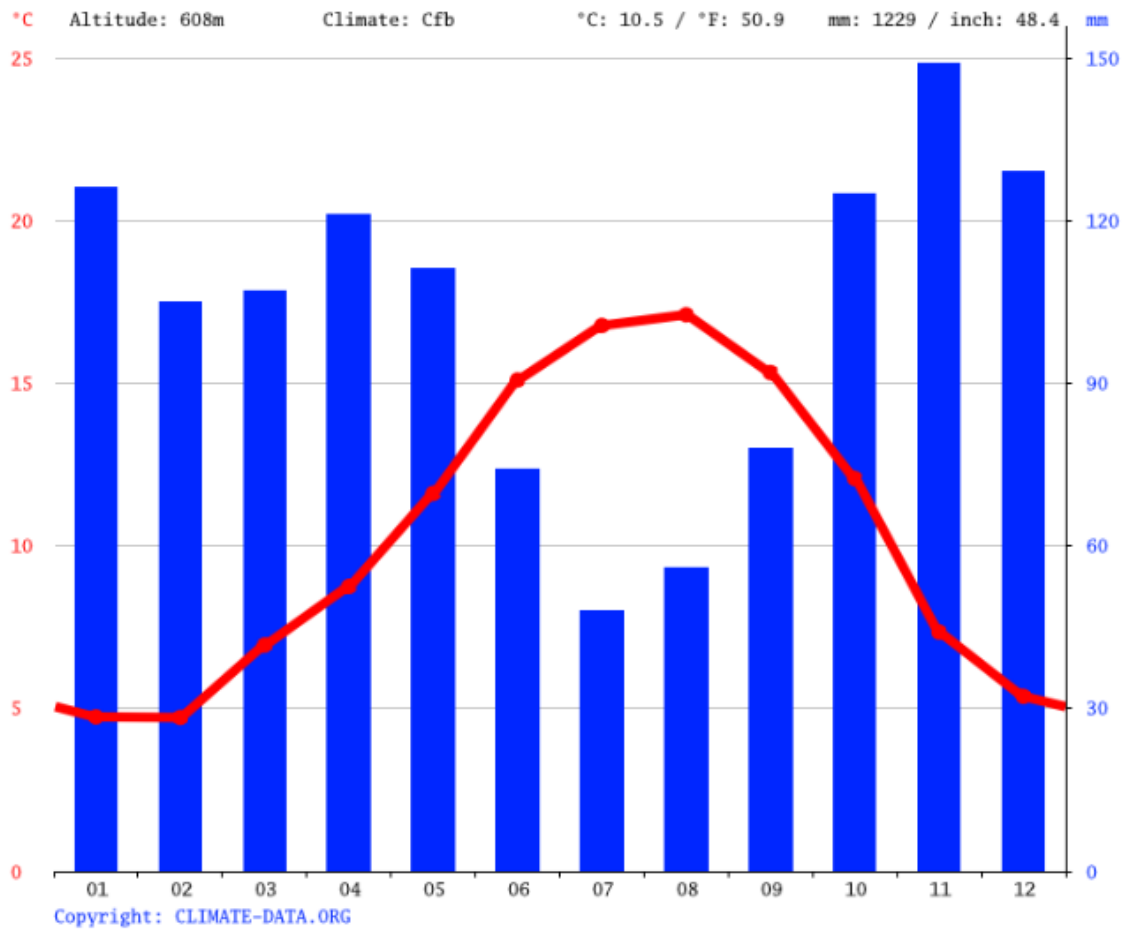


Figura 29 Climograma Grandas de Salem entre els anys 1999-2019

QA Stats for _250m_16_days_VI_Quality

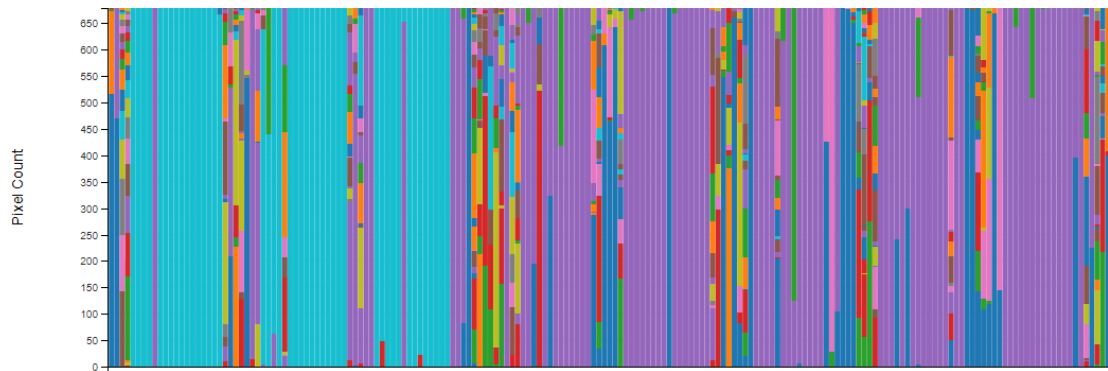


Figura 30 Qualitat dels resultats obtinguts de Grandas de Salime, AppEEARS

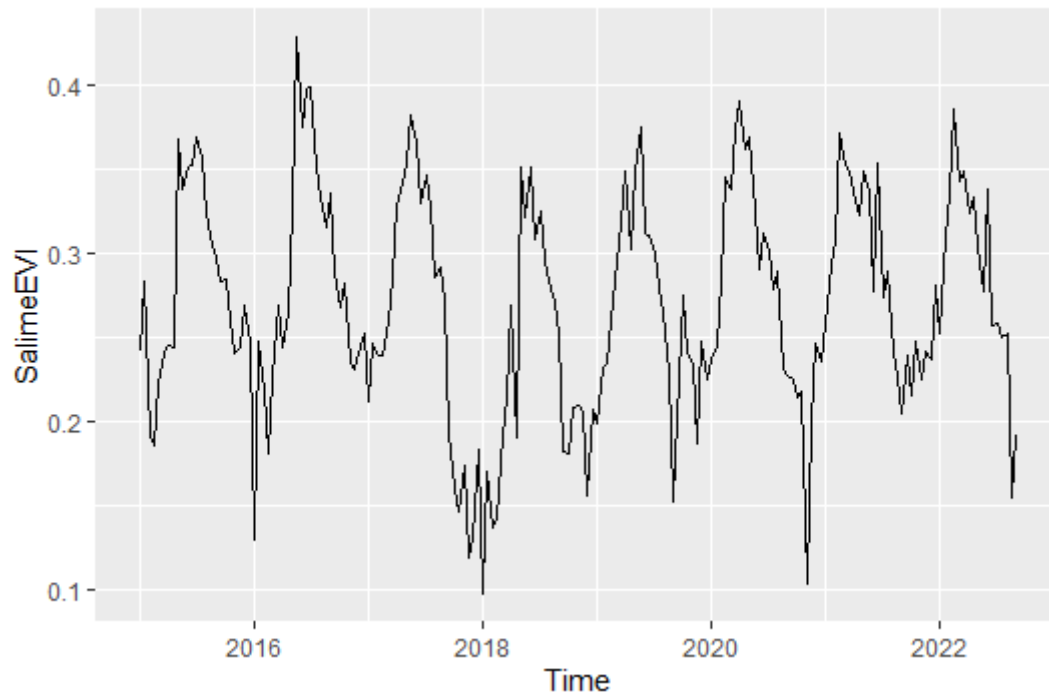


Figura 31 Tendência EVI Grandas de Salime, 2015-2022

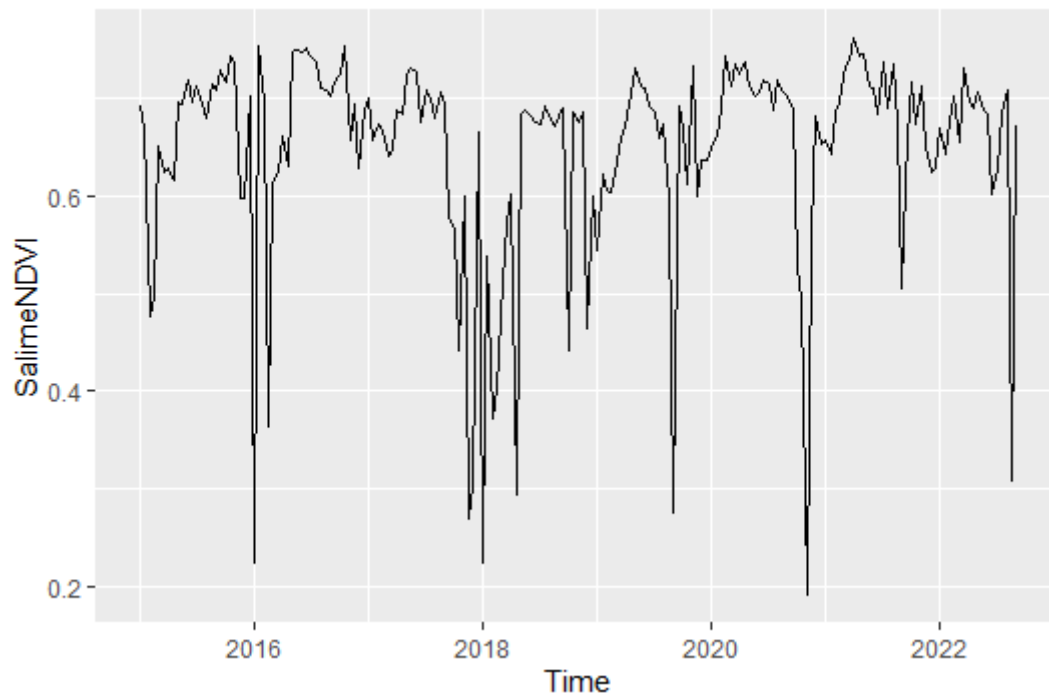


Figura 32 Tendência NDVI Grandas de Salime, 2015-2022

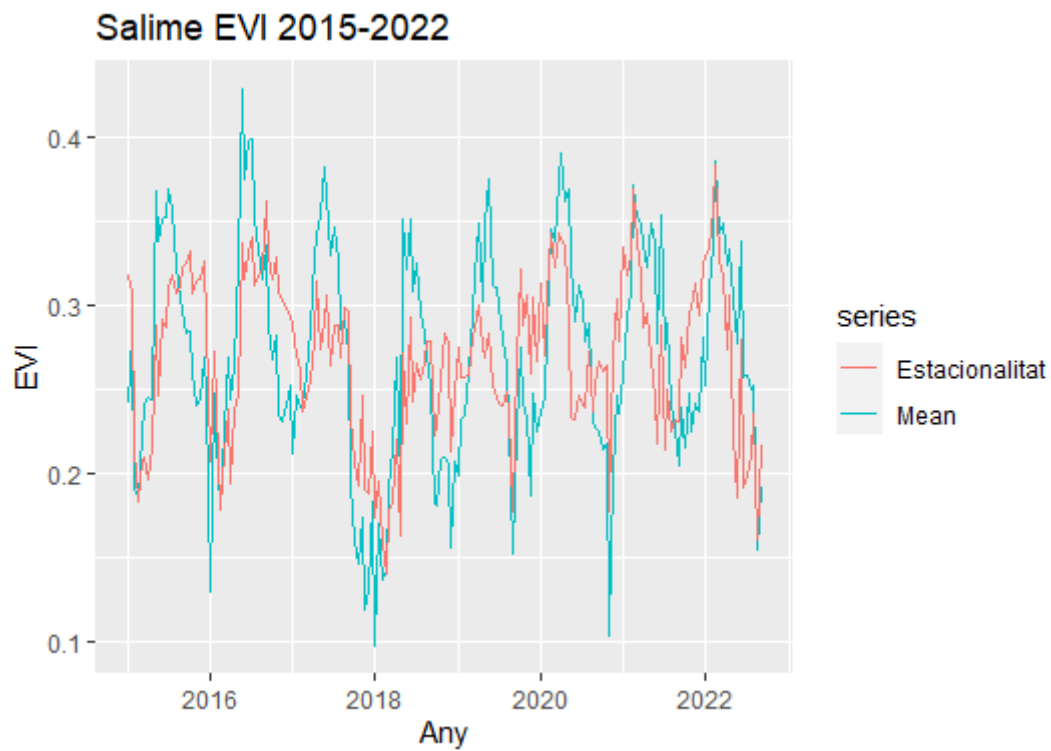


Figura 33 Índex d'estacionalitat de l'EVI del cas Grandas de Salime, 2015-2022

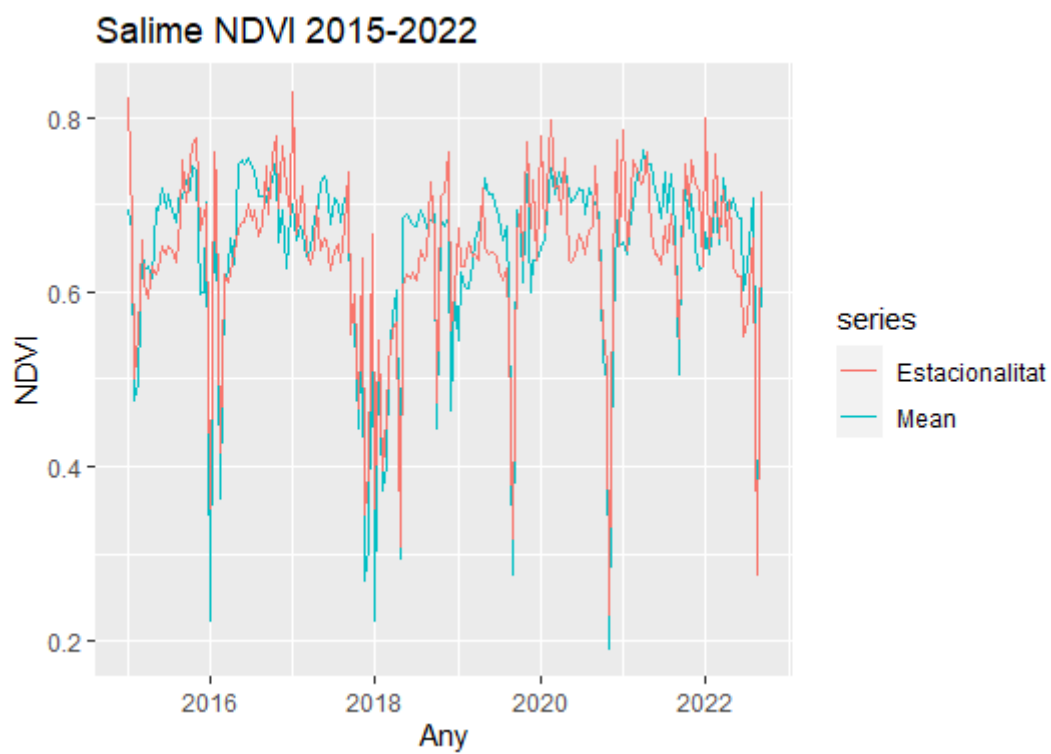


Figura 34 Índex d'estacionalitat de l'NDVI del cas Grandas de Salime, 2015-2022