



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
y del Medio Natural

INCIDENCIA DE LOS INCENDIOS FORESTALES SOBRE
LA ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS DEL SUELO

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural

AUTOR/A: Murillo Gallego, Macarena

Tutor/a: Ibañez Asensio, Sara

Cotutor/a: Moreno Ramón, Héctor

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Escuela Técnica Superior
de Ingeniería Agronómica
y del Medio Natural

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL

INCIDENCIA DE LOS INCENDIOS FORESTALES SOBRE LA ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS DEL SUELO

Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural

Curso 2021/2022

Autora: Macarena Murillo Gallego

Tutora: Sara Ibáñez Asensio

Cotutor: Héctor Moreno Ramón

Valencia, septiembre de 2022

Título: Incidencia de los incendios forestales sobre la estabilidad de los agregados del suelo.

Resumen: Los incendios forestales son una de las mayores amenazas para los bosques mediterráneos. En los últimos años, han ido cobrando mayor protagonismo en nuestros ecosistemas poniendo de manifiesto los daños ambientales, económicos y sociales que conllevan.

Las consecuencias que se producen a nivel de la cobertura vegetal a causa de este fenómeno natural son evidentes, sin embargo, no se repara en el elemento vital sobre el que se desarrolla y sustenta la vida, el suelo.

El suelo es un componente esencial de los ecosistemas que está constituido por partículas orgánicas e inorgánicas que se unen formando agrupaciones denominadas agregados. Un suelo con buenos agregados supone un suelo fértil, capaz de suministrar todos los servicios ecosistémicos con normalidad.

Los incendios forestales pueden llegar a desestructurar estos agregados comprometiendo su estabilidad. Por consiguiente, tras el fuego disminuye su resistencia a desintegrarse por la acción de fuerzas externas, tanto naturales como antrópicas como son el impacto de las gotas de lluvia, el tránsito de ganado, etc., ocasionando pérdida de fertilidad y erosión del suelo.

El presente trabajo tiene como objetivo determinar la estabilidad de los agregados de suelos sometidos a diferentes temperaturas de calcinación, representativas de fuegos de diferentes severidades. Para ello, se emplearán muestras de suelos forestales de distintas características. Mediante la aplicación de técnicas de análisis normalizadas y estandarizadas (MAPA y USDA), se determinarán parámetros edáficos básicos en la formación y estabilidad de los agregados como textura, contenido en materia orgánica y otros elementos del suelo. Los datos obtenidos permitirán realizar una valoración de la importancia de estas propiedades respecto a la relación de la estabilidad del agregado y la temperatura alcanzada en los incendios, obteniéndose la ecuación de correlación entre las variables a partir de herramientas estadísticas básicas.

Palabras clave: Incendios forestales mediterráneos, estabilidad de agregados, temperatura de calcinación, propiedades del suelo.

Autora: Macarena Murillo Gallego

Tutora: Sara Ibáñez Asensio

Cotutor: Héctor Moreno Ramón

Title: Incidencia de los incendios forestales sobre la estabilidad de los agregados del suelo.

Abstract: Forest fires are one of the greatest threats to Mediterranean forests. In recent years, they have been gaining more prominence in our ecosystems, highlighting the environmental, economic and social damage that they entail.

The consequences that occur at the plant cover level due to this natural phenomenon are evident. However, the vital element on which life develops and sustains itself, the soil, is not repaired.

Soil is an essential component of ecosystems that is made up of organic and inorganic particles that come together to form groups called aggregates. A soil with good aggregates supposes a fertile soil, capable of supplying all the ecosystem services normally.

Forest fires can destroy soil aggregates, compromising their stability. Consequently, its resistance to disintegration by the action of external forces, both natural and anthropic such as impact of raindrops, cattle transit, etc., decreases, causing loss of fertility and soil erosion.

The present study aims to determine the stability of soil aggregates subjected to different calcination temperatures, representative of fires of different severities. For this, forest soil samples of different characteristics will be used. Basic edaphic parameters in the formation and stability of aggregates such as texture, organic matter content and other soil elements, will be determined by using standardized and normalized analysis techniques. The collected data will allow an assessment of the importance of these properties with respect to the relationship between the stability of the aggregate and the temperature reached in fires. Thus, the correlation equation between the variables will be obtained from basic statistical tools.

Keywords: Mediterranean forest fires, aggregates stability, calcination temperature, soil parameters.

Author: Macarena Murillo Gallego

Tutor: Sara Ibáñez Asensio

Cotutor: Héctor Moreno Ramón

Valencia, September 2022

Índice

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Los incendios forestales en el mediterráneo | 1 |
| 1.2. Efecto de los incendios forestales..... | 2 |
| 1.3. Efecto de los incendios forestales en la estabilidad de los agregados del suelo | 4 |
| 2. Objetivos y justificación | 5 |
| 3. Materiales y metodología | 6 |
| 3.1. Muestras empleadas y puntos de muestreo..... | 6 |
| 3.2. Análisis de laboratorio..... | 8 |
| 3.2.1. Caracterización de los suelos | 8 |
| 3.2.2. Análisis de estabilidad de los agregados | 10 |
| 3.3. Metodología para el análisis estadístico de los datos..... | 11 |
| 4. Resultados y discusión | 12 |
| 4.1. Caracterización de los suelos | 12 |
| 4.1.1. Textura | 12 |
| 4.1.2. Materia orgánica | 12 |
| 4.1.3. pH..... | 13 |
| 4.1.4. Conductividad eléctrica..... | 14 |
| 4.1.6. Carbonatos | 15 |
| 4.2. Estudio de los parámetros del suelo según los factores ambientales | 17 |
| 4.2.1. Localización | 17 |
| 4.2.2. Tipo de vegetación | 18 |
| 4.2.3. Material geológico..... | 19 |
| 4.2.4. Superficie quemada/no quemada..... | 20 |
| 4.2.5. Suelo pastoreado/no pastoreado | 22 |
| 4.3. Estudio de la estabilidad de los agregados | 22 |
| 4.3.1. Estabilidad de los agregados vs parámetros del suelo..... | 24 |
| 4.3.2. Estabilidad de los agregados vs factores ambientales | 32 |
| 5. Conclusión | 37 |
| 6. Bibliografía | 38 |
| 6.2. Bibliografía complementaria..... | 39 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Valores de la materia orgánica según el origen de las muestras. | 13 |
| Tabla 2. Valores del pH según el origen de las muestras..... | 14 |
| Tabla 3. Valores de la CE según el origen de las muestras..... | 15 |
| Tabla 4. Valores de los carbonatos según el origen de las muestras..... | 16 |
| Tabla 5. Valores de la estabilidad de los agregados a diferentes temperaturas. | 22 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Triángulo del fuego (Garzón, 2018)..... | 1 |
| Figura 2. Efecto Foehn (DISCOVERY, 2018)..... | 2 |
| Figura 3. Efecto del fuego en los suelos (del Campo, 2021) | 3 |
| Figura 4. Localización de las zonas de estudio | 6 |
| Figura 5. Valores de la materia orgánica en suelos (Saña et al., 1996)..... | 13 |
| Figura 6. Valores de pH en suelos (Porta et al., 2003). | 14 |
| Figura 7. Valores de la conductividad eléctrica en suelos (Saña et al., 1996)..... | 15 |
| Figura 8. Valores de los carbonatos en suelos (Soriano, 2017) | 16 |
| Figura 9. Gráfico de medias del porcentaje de arcillas según la localización. | 17 |
| Figura 10. Gráfico de medias del pH según la localización. | 18 |
| Figura 11. Gráfico de medias del porcentaje de carbonatos según el tipo de vegetación. | 18 |
| Figura 12. Gráfico de medias del pH según el tipo de vegetación. | 19 |
| Figura 13. Gráfico de medias del porcentaje de arcilla según el material geológico..... | 20 |
| Figura 14. Gráfico de medias del pH según el material geológico. | 20 |
| Figura 15. Gráfico de medias del porcentaje de arcillas según el tipo de superficie..... | 21 |
| Figura 16. Gráfico de medias del porcentaje de carbonatos según el tipo de superficie..... | 21 |
| Figura 17. Gráfico de medias de la conductividad eléctrica según el tipo de superficie. | 22 |
| Figura 18. Valores de la estabilidad de agregados según la textura..... | 23 |
| Figura 19. Gráfico de comparación de medias de la estabilidad de los agregados a distintas temperaturas..... | 23 |
| Figura 20. Gráfico de dispersión de la estabilidad de los agregados frente a la materia orgánica. | 25 |
| Figura 21. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados en condiciones naturales y materia orgánica. | 26 |
| Figura 22. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 450°C y porcentaje de arcillas. | 27 |
| Figura 23. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 450°C y porcentaje de carbonatos..... | 28 |
| Figura 24. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 450°C y pH en Serra..... | 28 |
| Figura 25. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 450°C y materia orgánica en Guadalaviar. | 29 |

| | |
|--|----|
| Figura 26. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 700°C y porcentaje de carbonatos..... | 30 |
| Figura 27. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 700°C y pH. | 31 |
| Figura 28. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 700°C y pH en Serra..... | 31 |
| Figura 29. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 700°C y carbonatos en Serra. | 32 |
| Figura 30. Gráfico de medias de la estabilidad de los agregados en función de la localización. | 33 |
| Figura 31. Gráfico de medias de la estabilidad de los agregados en función del tipo de vegetación. | 34 |
| Figura 32. Gráfico de medias de la estabilidad de los agregados en función del material geológico. | 35 |
| Figura 33. Gráfico de medias de la estabilidad de los agregados en función de la superficie quemada o no quemada. | 36 |
| Figura 34. Gráfico de medias de la estabilidad de los agregados en función de la zona pastoreada o no pastoreada. | 36 |

1. Introducción

Los incendios forestales forman parte de la historia de la naturaleza, contribuyen a la regeneración de los ecosistemas y producen numerosos hábitats en los que pueden prosperar distintos organismos, por lo que no se pueden considerar ajenos a los ecosistemas terrestres. El fuego es considerado a menudo un factor negativo que hay que eliminar, sin embargo, no provoca únicamente efectos negativos pues se trata de un factor ecológico natural que ha contribuido a modelar el paisaje (ASHES TO LIFE, 2019). Asimismo, favorece la movilización de nutrientes y permite mantener el carbono en el suelo. No obstante, en los últimos años ha tenido lugar un aumento de los incendios forestales que ha originado la alteración de los regímenes de incendios causando graves efectos adversos en los ecosistemas. El aumento de estos sucesos ha puesto de manifiesto los daños ambientales, socioeconómicos que conllevan.

1.1. Los incendios forestales en el mediterráneo

Los incendios forestales son frecuentes en el mediterráneo por diversos factores. En primer lugar, se debe considerar que el fuego se constituye por tres elementos: calor, oxígeno y combustible. Estos forman el triángulo del fuego (figura 1) y se precisa de los tres para poder generarse.



Figura 1. Triángulo del fuego (Garzón, 2018)

En la actualidad, debido al abandono rural de la segunda mitad del siglo XX y los cambios socioeconómicos que han tenido lugar en los últimos años, muchos de los montes de España se encuentran descuidados, con grandes acumulaciones de combustible y continuidad de copas. Esto ha propiciado la aparición de fuegos de intensidades y velocidades elevadas además de incendios con mayor ocurrencia y magnitud.

El clima mediterráneo dominante en la península es otro de los factores a tener en cuenta. Este se caracteriza por inviernos suaves y lluviosos y veranos secos y calurosos que a menudo se prolongan hasta octubre. En verano el mediterráneo está sometido a la influencia de las anticiclones subtropicales secos que se retiran en invierno hacia latitudes más bajas dando paso a las borrascas atlánticas de latitudes templadas. Los ecosistemas mediterráneos cuentan con un clima de transición entre el régimen templado oceánico y tropical seco que se caracteriza por que coincide la época seca con la cálida (Arianoutsou et al., 1993).

En la Península Ibérica, debido a la topografía del terreno se produce el conocido efecto Foehn (figura 2). Este efecto consiste en el calentamiento del aire producido al descender éste por las vertientes de las montañas opuestas a la dirección de los vientos (IGN, 2017).

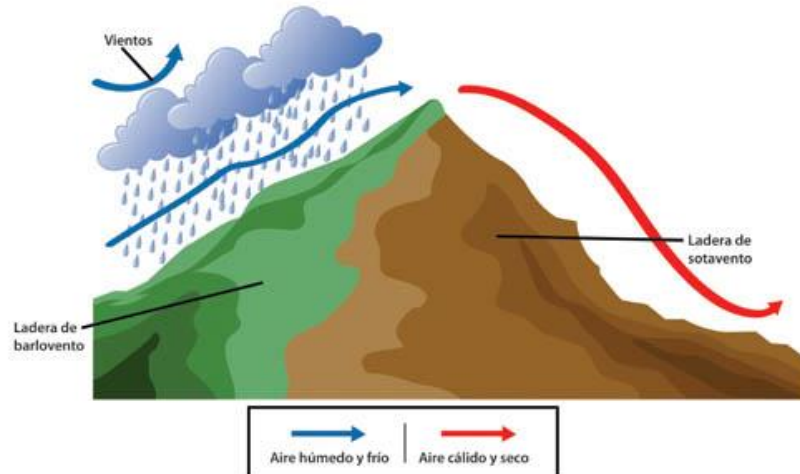


Figura 2. Efecto Foehn (DISCOVERY, 2018)

Las cordilleras más propensas a provocar este fenómeno en la Península Ibérica son las orientadas oeste-este, perpendiculares a los vientos del norte y noreste del Cantábrico. En el caso de la vertiente mediterránea, los vientos húmedos del levante son retenidos por las elevaciones costeras que forman el sistema Ibérico, provocando clima muy seco en la zona del Ebro, castilla la mancha, parte del Almería y el Guadalquivir (AEMET, 2017).

Si a estas características se suman las escasas lluvias, las altas temperaturas en verano que reducen la humedad de los combustibles, y el cambio climático, se favorece la aparición y expansión de los incendios forestales. Por ello, estos constituyen una de las principales amenazas en nuestros ecosistemas.

1.2. Efecto de los incendios forestales

Los incendios forestales tienen efectos importantes sobre los ecosistemas. Sobre la vegetación, los principales efectos del fuego son los siguientes:

- Reduce temporalmente la competencia por agua, nutrientes y radiación solar al producirse un aumento de la iluminación y las oscilaciones de temperatura que favorece a ciertas especies como por ejemplo *Pinus halepensis*.
- Puede originar un aumento del ataque de plagas y enfermedades por heridas, que conllevaría a un cambio en la fauna y entomofauna.
- La alteración de los ciclos biogeoquímicos y la erosión ocasionada producen la disminución de la materia orgánica y la porosidad del suelo afectando el estado de la vegetación.
- Activa la liberación de semillas en determinadas especies además de alterar el banco de semillas edáfico eliminando el humus y la hojarasca y dejando el suelo desnudo. De esta manera, se altera la germinación y supervivencia de las especies forestales.
- Estimula la floración y fructificación de numerosas especies de arbustos y herbáceas y el rebrote y la reproducción vegetativa de otras muchas especies forestales.
- Puede originar la pérdida de parte de la comunidad vegetal.

Las consecuencias que se producen a nivel de la cobertura vegetal a causa de los incendios forestales son evidentes, sin embargo, no se repara en el elemento vital sobre el que se desarrolla y sustenta la vida, el suelo.

El suelo es un componente esencial de los ecosistemas sobre el que se desarrolla y sustenta la vida. Este se entiende como una cubierta fina compuesta por la mezcla de minerales, aire, agua y microorganismos vegetales y animales que se ha formado paulatinamente a través de la descomposición y disgregación de las rocas superficiales por fenómenos naturales tal como, cambios de temperatura, movimientos de masa de aire y agua (González, 2009). Se trata de un recurso no renovable a escala de tiempo humano pues, según la FAO, la naturaleza puede tardar entre 40 y 1000 años en formar 1 cm de espesor de suelo fértil. Por ello, su preservación es de vital importancia.

Tras un incendio forestal, si no transcurre el tiempo necesario para que el bosque se recupere de modo natural, se produce una degradación progresiva del mismo, y con él, de los suelos sobre los que se desarrolla (ASHES TO LIFE, 2019).

Los efectos producidos por el fuego en los suelos (figura 3) varían en función de su intensidad, frecuencia y duración además de las propiedades de los combustibles y el tipo de suelo.

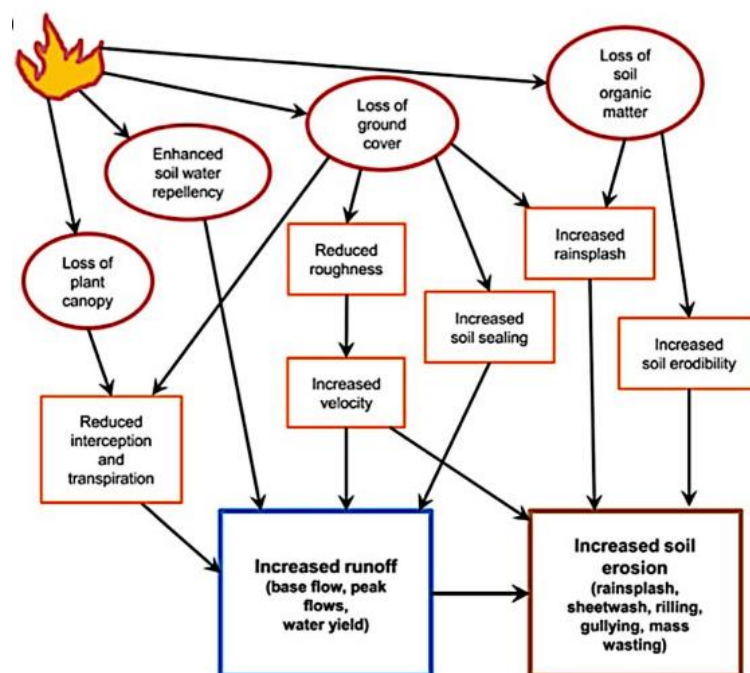


Figura 3. Efecto del fuego en los suelos (del Campo, 2021)

Los efectos perjudiciales del fuego sobre el suelo son los siguientes:

- Hidrofobicidad: Las materia orgánica producida por los microorganismos del suelo tienden a acumularse en el mantillo y las capas de hojarasca formando una capa relativamente permeable. Los incendios alteran la composición molecular de la materia orgánica y la proporción de ácidos grasos de cadena larga (ASHES TO LIFE, 2019). De esta manera, se produce un aumento de la cantidad de componentes hidrófobos que se condensan y adhieren a las partículas del suelo reduciendo la capacidad de infiltración.

- Pérdida de la materia orgánica: La cantidad de materia orgánica se ve reducida por la combustión, perdiéndose las propiedades cementantes que mantienen unidos los agregados. Como consecuencia estos se desestabilizan y disgregan favoreciendo su eliminación por los agentes erosivos.

- Alteración de los ciclos biogeoquímicos: Los nutrientes almacenados en los combustibles y la materia orgánica sufren graves alteraciones durante la combustión. El fuego tiende a aumentar la concentración de ciertos elementos solubles como los cationes K, Ca y Mg y a disminuir aniones como fosfatos y sulfatos. Además, reduce el nitrógeno orgánico y produce un aumento del inorgánico. El pH y la conductividad eléctrica aumentan debido al aporte de carbonatos, cationes básicos y óxidos procedentes de las cenizas (del Campo, 2021). Después de los incendios aumenta el contenido de nutrientes en la superficie debido a la deposición de cenizas y mineralización de nutrientes. No obstante, con el tiempo el contenido de nutrientes va disminuyendo al producirse su volatilización y transformación además de la eliminación de las cenizas (Caon, 2014).

- Pérdida de actividad biológica: Debido a las altas temperaturas, muchos organismos del suelo mueren disminuyendo su actividad biológica. Como consecuencia, se desestabilizan los ciclos biogeoquímicos de elementos que dependen de las plantas, animales y microorganismos que ayudan los procesos de descomposición de compuestos orgánicos y fitodisponibilidad de nutrientes (Mataix-Solera et al., 2011).

A causa de los motivos mencionados anteriormente, se produce un importante incremento en la erosión de los suelos y la escorrentía.

1.3. Efecto de los incendios forestales en la estabilidad de los agregados del suelo

El suelo es un componente esencial de los ecosistemas que está constituido por partículas orgánicas e inorgánicas que se unen formando agrupaciones denominadas agregados. Un suelo con buenos agregados supone un suelo fértil, capaz de almacenar en sus poros agua fácilmente disponible para las plantas al tiempo de evitar la pérdida por percolación de elementos esenciales para las plantas y de suministrar todos los servicios ecosistémicos con normalidad.

En función de su tamaño los agregados se clasifican en micro y macro.

Según indica Alarcón (2016), los microagregados son agrupaciones de coloides floculados con un tamaño inferior a 200-250 μm . Estos se unen a partículas de limo y arena fina mediante compuestos orgánicos altamente polimerizados (ácidos húmicos) originándose la formación del complejo arcillo-húmico. En el caso de los macroagregados, estos son agrupaciones de microagregados con un tamaño superior a 250 μm , cuyos agentes de unión son los óxidos, carbonatos y materiales orgánicos fácilmente degradables por los microorganismos como los polisacáridos, péptidos, ácidos fúlvicos, etc.

Cuanto mayor estabilidad tienen los agregados, la estructura del suelo permanece inalterada durante mayor tiempo, por lo tanto, cuando se producen lluvias no se forma costra en la superficie del suelo y el agua se infiltra correctamente.

Por otra parte, la estabilidad de los agregados está estrechamente relacionada con la materia orgánica y a su vez, con la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Esta retiene y suministra elementos nutrientes evitando que se laven con las lluvias.

Los incendios forestales pueden llegar a desestructurar estos agregados debido principalmente a la pérdida de la materia orgánica comprometiendo su estabilidad. Por consiguiente, tras el fuego disminuye su resistencia a desintegrarse por la acción de fuerzas externas, tanto naturales como antrópicas como son el impacto de las gotas de lluvia, el tránsito de ganado, etc., ocasionando pérdida de fertilidad y erosión del suelo.

Hasta el momento se han realizado numerosos estudios sobre los efectos de los incendios forestales en la estabilidad de los agregados, cuyas conclusiones, en líneas generales, son las siguientes:

- Se produce una disminución del tamaño de los agregados por el impacto del fuego.
- Existe una tendencia hacia agregados con mayor inestabilidad en la superficie del suelo durante el primer año tras el incendio (Cerdá, 1993).
- Hay una relación clara entre la estabilidad de los agregados y el contenido en materia orgánica (Mataix-Solera et al., 2011). La estabilidad de los agregados se ve reducida y se hace notable con el paso del tiempo, al quedar los suelos descubiertos durante más tiempo. Generalmente tras los incendios se detecta una reducción de la estabilidad de los agregados relacionada con la pérdida de materia orgánica (Giovanni y Lucchesi, 1983).
- La exposición de las laderas (sur y norte) es un factor fundamental. Los estudios muestran que las laderas con exposición sur dan lugar a agregados menos estables, incluso inferiores a las de laderas norte que han sido afectadas por un incendio recientemente (Cerdà et al., 2009).

A pesar de esto, es posible encontrar efectos distintos cuando los fuegos son de baja intensidad. En ellos, se puede producir un aumento en la agregación o los agregados pueden sufrir modificaciones debido a la cementación del suelo por el fuego (Cerdà et al., 2009). Debido esta cementación ocasionada por el aumento de la temperatura o el incremento de la hidrofobicidad, también es posible que se generen agregados muy estables (Mataix-Solera y Doerr, 2004).

Se hace pues evidente que este tema sigue suponiendo un reto científico y debe estudiarse con más detalle ya que los incendios forestales son una de las principales amenazas para nuestros ecosistemas y para afrontar la recuperación de los montes tras estos eventos, es necesario conocer las alteraciones que causa el fuego en el ecosistema. Por ello, es importante estudiar los cambios que tienen lugar en las propiedades fisicoquímicas de los suelos, de las cuales dependerá la recuperación de la vegetación.

2. Objetivos y justificación

El presente trabajo tiene como objetivo principal conocer cómo afectan las altas temperaturas características de los incendios forestales a la estabilidad de los agregados del suelo.

Los objetivos secundarios son los siguientes:

- Conocer las propiedades de los suelos forestales de distintos ambientes mediterráneos.
- Conocer las relaciones existentes entre las propiedades fisicoquímicas de los suelos y la estabilidad de sus agregados.
- Estudiar las diferencias en la estabilidad de los agregados debido a diferentes factores ambientales como el origen geográfico, el tipo de vegetación, el material geológico, suelos con superficie quemada o no quemada por incendios forestales y suelos pastoreados o no.

3. Materiales y metodología

Para la realización del trabajo se han empleado un total de 47 muestras de suelos de distintas zonas forestales, de las cuales 43 se han obtenido del repositorio de muestras de la Unidad Docente de Suelos del Departamento de Producción Vegetal de la ETSIAMN. Las 4 restantes se obtuvieron en un muestreo realizado en el municipio de Serra.

Todas las muestras empleadas para la realización del estudio proceden de gran diversidad de zonas con materiales geológicos y coberturas vegetales diferentes, habiendo muestras procedentes de zonas quemadas y no quemadas, y pastoreadas y no pastoreadas. Esta variedad se considera útil para poder obtener un gran abanico de datos de los diferentes parámetros fisicoquímicos del suelo y así poder comparar la consecuencia del fuego sobre la estabilidad de los agregados con mayor precisión. Todas las muestras han sido analizadas en laboratorio para determinar la estabilidad de los agregados del suelo sometido a distintas temperaturas de calcinación. Asimismo, se han determinado diferentes parámetros edáficos básicos para la formación y estabilidad de los agregados como textura, contenido en materia orgánica y otros elementos del suelo como pH y salinidad.

El procedimiento seguido se expone a continuación.

3.1. Muestras empleadas y puntos de muestreo

Debido a que los incendios forestales afectan a la capa superficial del suelo, tanto las muestras recogidas en campo, como las obtenidas en laboratorio, comprenden los primeros centímetros de la superficie del suelo. Se trata además de muestras alteradas, ya que han perdido la estructura que poseían in-situ.

Para la realización del muestreo se han escogido 4 puntos de una zona del Parque Natural de la Sierra Calderona, en el municipio de Serra, donde tuvo lugar un incendio el día 3 de febrero de 2022.

El muestreo se realizó el 13 de febrero de 2022, tomando muestras de la parte superficial del suelo mediante el uso de una pala de jardinería y varias bolsas con cierre hermético.

En la siguiente figura (figura 4) se muestra la localización de las diferentes zonas estudiadas:

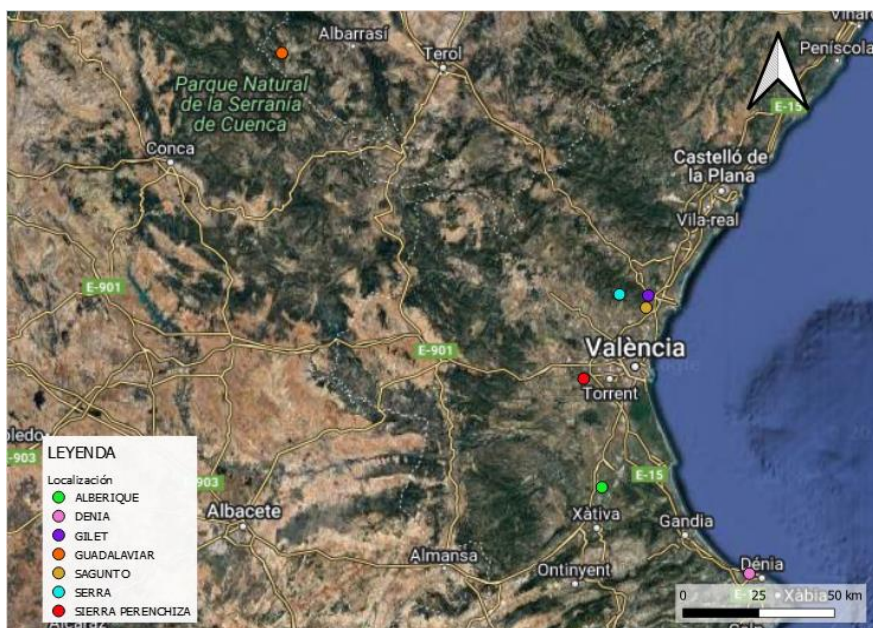


Figura 4. Localización de las zonas de estudio

Las coordenadas de las muestras recogidas en campo y otros detalles relativos a su localización o características se presentan en el Anexo I, describiéndose a continuación las características generales de las distintas zonas estudiadas.

Serra

Las muestras del municipio de Serra pertenecen a la Sierra Calderona. El clima de la zona es el típico mediterráneo, con oscilaciones de temperatura moderadas y precipitaciones irregulares. Generalmente predominan las zonas boscosas con pino carrasco y matorral mediterráneo. El material geológico de la zona viene representado mayoritariamente por calizas y areniscas. Los suelos son generalmente básicos. En esta zona se han obtenido muestras con superficie quemada y no quemada, todas ellas sin pastorear. La localización de las muestras de esta zona se refleja en la figura 4 del Anexo I.

Gilet

Las muestras del municipio de Gilet pertenecen a la Sierra Calderona. El clima de la zona, y la vegetación son los mismos que en Serra, típico mediterráneo y abundancia de pino halepensis, en este caso con mayor presencia de zonas agrícolas. El material geológico de la zona estudiada viene representado mayoritariamente por aluviones, coluviones y arcillas con cantos. Al igual que en Serra los suelos son mayormente básicos. De esta zona no se han obtenido muestras ni quemadas ni pastoreadas. La localización de las muestras de esta zona se refleja en la figura 4 del Anexo I.

Sagunto

Al igual que las dos zonas anteriores, las muestras también pertenecen a la Sierra Calderona y presenta las mismas condiciones climáticas. La vegetación predominante sigue siendo la típica mediterránea y en cuanto a materiales geológicos se encuentran suelos calizos con pH básicos. En este caso, hay muestras tanto quemadas como no quemadas. No obstante, no hay muestras pastoreadas. La localización de las muestras de esta zona se refleja en la figura 4 del Anexo I.

Sierra Perenchiza

El clima de la zona es el típico mediterráneo y la vegetación predominante es el pino halepensis junto con el matorral mediterráneo. El material geológico de la zona viene representado mayoritariamente por calizas, dolomías, margas y margocalizas. El pH de los suelos también es básico en este caso. De esta zona se han obtenido numerosas muestras con superficie quemada y no quemada, todas ellas sin pastorear. La localización de las muestras de esta zona se refleja en la figura 6 del Anexo I.

Guadalaviar

Guadalaviar es una localidad perteneciente a Teruel, Aragón. El clima es cálido y templado, con precipitaciones abundantes incluso en el mes más seco. La vegetación de la zona muestreada viene representada por el pino albar, sabinas y enebros, con coluviones como material geológico. El pH en este caso es ácido y algunos de los suelos de esta zona están pastoreados. No se han obtenido muestras quemadas. La localización de las muestras de esta zona se refleja en la figura 5 del Anexo I.

Denia

El clima de la zona es también mediterráneo. En esta zona se han obtenido muestras de parcelas de cultivo abandonadas, con pH generalmente neutro y coluviones como material

geológico. Todas las muestras están pastoreadas. La localización de las muestras de esta zona se refleja en la figura 3 del Anexo I.

Alberique

Como la mayoría de las zonas estudiadas, este municipio presenta clima mediterráneo. La vegetación de estas muestras corresponde con matorrales mediterráneos y vegetación de ribera, con calizas y materiales de carácter aluvial, arenas y limos. El pH es básico y en este caso, no se han obtenido muestras quemadas ni pastoreadas. La localización de las muestras de esta zona se refleja en la figura 2 del Anexo I.

3.2. Análisis de laboratorio

Las muestras de los suelos disponibles en el repositorio del laboratorio han sido caracterizadas con anterioridad por otros alumnos. Por lo tanto, se ha procedido a la realización de los ensayos de estabilidad de agregados de todas las muestras y la caracterización de las 4 muestras de suelos recogidas en campo.

3.2.1. Caracterización de los suelos

Para realizar la caracterización de los suelos se han determinado diferentes parámetros edáficos siguiendo los procedimientos que se describen a continuación:

3.2.1.1. Textura

Los suelos están formados por partículas de diferentes tamaños que, a su vez, se presentan en diferentes proporciones. La proporción en peso en la que se presentan las partículas del suelo menores de 2 mm de diámetro define la textura. En función del diámetro de las partículas se pueden encontrar limos, arenas y arcillas, cuyos tamaños se clasifican de la siguiente manera según la FAO:

- Arena: 2 mm a 0.05 mm
- Limo: 0.05 mm a 0.002 mm
- Arcilla: < 0.002 mm

Para la determinación de la textura se ha llevado a cabo el método Bouyoucos. Para su realización, se pesan 40 g de suelo a los que se añade 100 ml de solución de hexametáfosfato de sodio para permitir la dispersión de todos los agregados, dejando remojar la muestra durante 10 minutos. Posteriormente, se bate el contenido durante 5 minutos y se transfiere a una probeta de 1000 ml enrasando con agua destilada hasta la señal. A continuación, se agita la muestra y se introduce un densímetro, realizando varias lecturas a diferentes tiempos (30'', 1', 3', 10', 30', 90' y >8 h). Los datos obtenidos se representan en un diagrama semilogarítmico, que nos permite obtener los porcentajes en peso de arena, limo y arcilla presentes en el suelo. Por último, con la ayuda de un diagrama textural, se determina el tipo de textura.

3.2.1.2. Materia orgánica

La biomasa viva, los residuos orgánicos parcialmente descompuestos de animales y plantas y los productos biosintetizados por los microorganismos del suelo componen la materia orgánica del suelo. (Gisbert e Ibáñez, 2010). Esta determina su calidad debido a que suministra y almacena nutrientes para las plantas y otros organismos del suelo, funciona como agente cementante manteniendo la forma de los agregados y aumenta la capacidad de retención de agua del suelo y la capacidad de intercambio catiónico entre otros.

Para su determinación en laboratorio se ha empleado el método de calcinación o LOI (Loss On Ignition), que consiste en la estimación de la cantidad de materia orgánica por pérdida de peso por calcinación. Para ello, se someten las muestras a 105°C en una estufa para que pierdan la humedad. A continuación, se pesan y se introducen en una mufla a 450°C. Por último, se vuelven a pesar las muestras y se calcula la cantidad de materia orgánica presente en el suelo, que corresponde con la diferencia entre el peso del suelo sometido a 105°C y el sometido a 450°C en porcentaje.

3.2.1.3. pH

El pH es un parámetro que determina la concentración de iones de hidrógeno presentes en un suelo, es decir, la acidez o alcalinidad que presenta. Éste, modifica la solubilidad de los minerales, por lo que resulta de vital importancia para la asimilación de nutrientes por parte de las plantas.

Para su determinación, se pesan 10 g de muestra de suelo y se añaden 25 ml de agua destilada. A continuación, se agita la muestra durante 10 minutos y se deja reposar durante 30 minutos. Por último, se procede a medir el pH mediante un pH-metro.

3.2.1.4. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del suelo determina la capacidad que tiene de conducir la corriente eléctrica y está relacionada con la concentración de sales disueltas. En los suelos, se obtiene a partir del agua extraída de la pasta de saturación del suelo. (Soil Survey Staff, 2014) Normalmente, se expresa en dS/m.

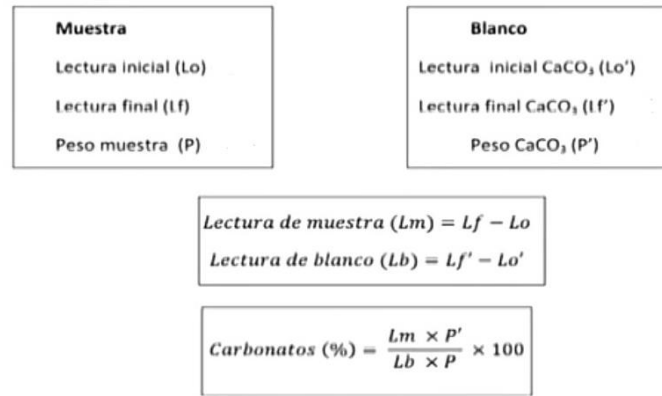
Para su determinación, se ha preparado una dilución 1:5, con una parte de suelo diluida en 5 partes de agua destilada. Para ello, se han pesado 5 g de suelo a los que se ha añadido 25 ml de agua destilada. A continuación, se ha agitado la muestra durante 30 minutos. Por último, se filtra y se mide la conductividad mediante un conductímetro en la fracción líquida de la dilución.

3.2.1.6. Carbonatos

Los carbonatos son sales que derivan de la combinación del ácido carbónico con un metal, presentando el complejo aniónico $(\text{CO}_3)^{2-}$. Tienen una acción positiva sobre la estructura del suelo y sobre la actividad microbiana (UNIVERSIDAD DE MÁLAGA, 2022). Sin embargo, en cantidades excesivas pueden modificar el pH del suelo alcalinizándolo e incluso ocasionar la retención de nutrientes.

El análisis de los carbonatos del suelo se basa en su reacción con el ácido clorhídrico y se mide en un calcímetro, que cuantifica el volumen de gas desprendido en la reacción. Para ello, se pesa de 0.5 a 1 g de suelo y se introduce en un tubo de análisis. A continuación, se introduce en un tubo de ensayo ácido clorhídrico al 50% hasta la mitad. Posteriormente, se introduce el tubo con ácido clorhídrico dentro del tubo de ensayo de muestras. Por último, se conecta el tubo al calcímetro y se anotan los valores previo y posterior a verter el ácido del nivel de la bureta y el depósito móvil ajustado.

Para determinar la cantidad de carbonatos se realizan los cálculos que se muestran a continuación:



3.2.2. Análisis de estabilidad de los agregados

La materia orgánica del suelo, como se ha mencionado anteriormente, es uno de los principales agentes cementantes que mantienen la forma de los agregados. Para su completa destrucción, usualmente se requiere de una temperatura entre 450°C y 500°C durante 4.5 horas. (UNIVERSIDAD DE GRANADA, 2022). Por consiguiente, las muestras se han sometido a 450°C en una mufla para eliminar la materia orgánica presente. También cabe mencionar que, en condiciones reales rara vez se superan los 1650°C en incendios muy intensos, con rangos de 700°C a 1000°C como normales. (Pyne et al., 1996). Así pues, se han sometido las muestras a una temperatura de 700°C en mufla. De esta manera, se han obtenido 3 muestras de cada suelo, una muestra sin calcinar, una muestra calcinada a 450° y otra calcinada a 700°C.

Para el análisis de la estabilidad de los agregados del suelo se ha empleado el método de tamizado en húmedo. Este método mide la cantidad de agregados que se mantienen estables en agua que fluye (USDA, 1999). Se basa en el principio de que los agregados menos estables se descomponen con mayor facilidad al sumergirse en agua.

En este ensayo, se ha estudiado la estabilidad de los microagregados del suelo. Estos, tienen un tamaño inferior a 0.2 mm, sin embargo, no existe ningún tamiz con tamaño de maya 0.2 mm normalizado. Los tamaños de maya normalizados que se disponen son de 0.125 mm y 0.25 mm. En caso de escoger el tamiz de 0.125 mm obtendríamos una fracción de microagregados retenidos. Por otra parte, si se escoge el tamaño de 0.25 mm se obtendría macroagregados en la muestra tamizada. No obstante, desde el punto de vista de la investigación, estos errores están asumidos en los cálculos. Asimismo, para el análisis de estabilidad de microagregados en laboratorio siempre se ha empleado el tamiz de 0.125 mm, por lo tanto, se hará uso de este.

Previamente a la introducción de las muestras en mufla y el análisis de estabilidad, se ha procedido a su secado a 105°C en estufa para eliminar por completo la humedad.

A continuación, se describe el procedimiento para la determinación de la estabilidad de los agregados:

En primer lugar, se pesan 4 g de suelo y se introducen en el tamiz de 0.125 mm de luz. A continuación, se rellena una cazoleta con 80 ml de agua destilada y se somete el tamiz a movimientos ascendentes y descendentes saturando la muestra durante 3 minutos. Transcurridos los 3 minutos se retira la cazoleta y se lleva a estufa a 105°C para obtener los agregados que se han desestabilizado en agua. Seguidamente, en otra cazoleta se añaden 80 ml de disolución de hexametáfosfato de sodio con concentración de 2 g/L y se vuelve a someter el tamiz a movimientos ascendentes y descendentes saturando la muestra durante 5 minutos, en este caso en la disolución de calgón. Por último, se retira la cazoleta y se recoge en

otro recipiente los restos de muestra que quedan en el tamiz. Ambos, se llevan a estufa a 105°C para retirar la humedad.

Para calcular la estabilidad de los agregados se divide el peso de los agregados estables en agua entre la cantidad total de los agregados.

La fórmula empleada para el cálculo se muestra a continuación:

$$\text{Agregados estables en agua (\%)} = \frac{(\text{peso de agregados secos} - \text{arena}) \times 100}{(\text{peso de suelo seco} - \text{arena})}$$

3.3. Metodología para el análisis estadístico de los datos

Tras realizar las analíticas de laboratorio pertinentes, se ha procedido a analizar los datos obtenidos. Para ello, se ha empleado el programa informático Statgraphics 18.

En primer lugar, se ha llevado a cabo el estudio de relación entre las variables estudiadas mediante la herramienta de *Análisis Multivariado (Correlaciones)*. Este nos proporciona los coeficientes de correlación de Pearson existentes entre las variables y el p-valor para un nivel de significación α de 0.05. Posteriormente, se han seleccionado las variables con un p-valor menor de 0.05, es decir, las variables que presentan una relación estadísticamente significativa con un nivel del 95%.

A continuación, se han estudiado las variables seleccionadas anteriormente para evaluar una por una y de forma más detallada la correlación existente mediante la herramienta *Regresión simple*. Esta herramienta nos permite conocer los detalles del análisis con mayor profundidad. Seguidamente se ha realizado una comparación de modelos alternos para determinar qué modelo se ajusta mejor a los datos, es decir, presenta un valor de r cuadrado mayor y se ha seleccionado para las distintas variables el modelo adecuado obteniéndose la ecuación de correlación.

Cabe mencionar, que la herramienta *Análisis Multivariado (Correlaciones)* nos proporciona información sobre la relación existente entre dos variables cuantitativas, por lo tanto, se ha realizado otro análisis para estudiar la relación entre las variables cuantitativas y cualitativas. Para ello, se ha empleado la herramienta *Comparación de varias muestras* separando los datos numéricos según los datos de texto coincidentes. Al igual que en el proceso anterior se han seleccionado las variables con p-valor menor que 0.05 que en este caso significa que existe una diferencia significativa entre las variables analizadas. Sin embargo, se ha tenido en cuenta un valor adicional importante para la veracidad de los resultados obtenidos. Se trata del p-valor obtenido en el análisis de verificación de la varianza por Levene. Todos los análisis de datos realizados en los que el p-valor obtenido en la verificación de la varianza es menor que 0.05, han sido rechazados, aunque se haya obtenido un resultado de diferencia significativa entre las variables ya que esto viola uno de los supuestos importantes subyacentes en el análisis de varianza e invalidará la mayoría de las pruebas estadísticas comunes.

Por último, se ha empleado la herramienta *Comparación de dos muestras independientes* para analizar las variables de las que se tienen varios grupos de muestras numéricos, como es el caso de la variable de estabilidad de los agregados con 3 grupos de muestras (no calcinada, calcinada a 450°C y calcinada a 700°C). Con ella se ha realizado una prueba t para comparar las medias, una comparación de las medianas y de las desviaciones estándar mediante la prueba F. Como en los casos anteriores, se han seleccionado las variables con p-valor menor que 0.05 que indicarían diferencias significativas en sus medias. Se ha tenido en cuenta que los valores

del sesgo y curtosis estandarizados estén dentro del rango -2 a +2, ya que valores de estos estadísticos fuera del rango indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar las pruebas que comparan las desviaciones estándar. Además, las pruebas-F y los intervalos de confianza mostrados dependen de que las muestras hayan provenido de distribuciones normales. Para probar esta suposición, se debe verificar los valores de sesgo estandarizado y de curtosis estandarizada.

Es preciso destacar que todos los análisis realizados a excepción de la comparación de dos muestras independientes se obtienen por el programa mediante test ANOVA.

4. Resultados y discusión

Tras la realización de los análisis de laboratorio y estadísticos se han obtenido los resultados que se exponen a continuación. Estos resultados se pueden consultar en la tabla 1 del Anexo I.

4.1. Caracterización de los suelos

En este apartado se exponen los resultados obtenidos en los distintos análisis realizados para la caracterización de los suelos.

4.1.1. Textura

Según los porcentajes de arena, limo y arcilla se han clasificado las muestras en distintas clases texturales.

Los porcentajes de un suelo ideal son: 40% de arena, 40% de limo y 20% de arcilla que corresponden con un suelo franco. Estos suelos permiten el crecimiento de la mayoría de las plantas en buenas condiciones. Además, la textura también influye en el comportamiento del agua en el suelo de tal manera que, si un suelo presenta un porcentaje de arena muy elevado, tendrá dificultades para retener el agua. Por el contrario, los suelos con altos porcentajes de arcilla no drenan correctamente el agua y por lo tanto se encharcan y dificultan el intercambio de aire en el suelo.

En este caso, se observa en la tabla 1 del Anexo I que la textura predominante es la franco arcillo-arenosa seguida de la franco arenosa, cuyos porcentajes de arena son elevados, lo que nos indica que estos suelos tienen dificultad de retención de agua y por consiguiente presentan inconvenientes en el transporte de nutrientes, la meteorización fisicoquímica, la translocación de sustancias y la nutrición de plantas y organismos del suelo. Por el contrario, las texturas menos frecuentes son la franco arcillosa y la franco arcillo-limosa.

Según la localización de las muestras, la textura predominante en cada zona es: la franco arcillo-arenosa en la Sierra Perenchiza, Sagunto y Serra; la franca y franco arenosa en Gilet; la franco arenosa en Guadalaviar; la arena franca en Denia y la franca y franco arcillo-arenosa en Alberique.

4.1.2. Materia orgánica

Como se puede observar en la tabla 1 del Anexo I, el valor medio para el porcentaje de la materia orgánica es de 15,71 % con un máximo de 66, 15 % y un mínimo de 3,46 %.

A continuación, se describen en la tabla 1 los datos obtenidos según el origen de las muestras:

Tabla 1. Valores de la materia orgánica según el origen de las muestras.

| Origen | Media (%) | Valor mínimo (%) | Valor máximo (%) |
|-------------------|-----------|------------------|------------------|
| Alberique | 10,72 | 8,74 | 12,71 |
| Denia | 6,71 | 4,27 | 9,53 |
| Guadalaviar | 9,64 | 5,71 | 18,20 |
| Gilet | 5,39 | 4,38 | 6,40 |
| Sagunto | 6,37 | 3,46 | 10,05 |
| Serra | 28,73 | 5,62 | 64,06 |
| Sierra Perenchiza | 17,22 | 3,71 | 66,15 |

Las muestras obtenidas en Serra presentan los valores medios más altos, al contrario de Gilet. Esto se debe principalmente al uso del suelo, que en el caso de Gilet se trata de una antigua zona agrícola de mandarinos abandonada y otra forestal próxima a la zona de cultivo abandonado. Por ello, los valores de Gilet son inferiores a los de Serra, que corresponde con zonas forestales con vegetación natural.

En función de la textura de cada muestra se han clasificado los valores de la materia orgánica desde muy bajo a muy alto. Dicha clasificación se muestra en la siguiente figura (figura 5):

| % Materia Orgánica | SUELO ARENOSO | SUELO FRANCO | SUELO ARCILLOSO |
|--------------------|---------------|--------------|-----------------|
| Muy bajo | 0 – 1,75 | 0 – 1,5 | 0 – 2 |
| Bajo | 1,76 – 2,5 | 1,5 - 2 | 2 – 3 |
| Normal | 2,51 – 3,5 | 2 – 3 | 3 – 4 |
| Alto | 3,51 – 4,25 | 3 – 3,75 | 4 – 5 |
| Muy alto | > 4,25 | > 3,75 | 5 |

Figura 5. Valores de la materia orgánica en suelos (Saña et al., 1996).

Según la anterior clasificación, se puede observar que casi la totalidad de las muestras presentan niveles de materia orgánica muy altos, a excepción de las muestras 11521 y 11030 con textura franco arcillo-arenosa y arcillosa con valor alto y normal respectivamente. En el caso de las muestras 12728, 12729, 11039, 11040 y 11536, el alto porcentaje de materia orgánica se debe a la cantidad de acículas y restos vegetales depositados en el mantillo. Debido a que en el mantillo no hay presencia de agregados, estas muestras no se han tenido en cuenta en el análisis de la estabilidad de los agregados.

4.1.3. pH

Los resultados de pH obtenidos para las muestras analizadas indican un valor medio de 7,45, con un mínimo de 5,28 correspondiente con la muestra 11252 de Guadalaviar y un máximo de 8,44 correspondiente con la muestra 12730 de Serra.

En la siguiente tabla (tabla 2) se muestran los valores obtenidos según el origen de las muestras:

Tabla 2. Valores del pH según el origen de las muestras.

| Origen | Media | Valor mínimo | Valor máximo |
|-------------------|-------|--------------|--------------|
| Alberique | 8,20 | 8,10 | 8,30 |
| Denia | 7,11 | 6,53 | 7,32 |
| Guadalaviar | 6,13 | 5,28 | 7,47 |
| Gilet | 7,63 | 7,43 | 7,83 |
| Sagunto | 7,68 | 7,41 | 7,89 |
| Serra | 7,65 | 7,17 | 8,44 |
| Sierra Perenchiza | 7,56 | 6,63 | 8,00 |

Como era de esperar, los valores de pH de las muestras, en líneas generales reflejan la basicidad de los suelos, ya que la zona este de la Península Ibérica presenta mayoritariamente suelos básicos, calizos con presencia de CaCO_3 .

Alberique presenta la media de pH más alto con un 8,20 de media. Por otra parte, Guadalaviar presenta la media más baja debido a la acidez de los suelos de la zona.

La interpretación de los valores del pH según los criterios USDA se muestra en la siguiente figura (figura 6):

| Valor del pH | Calificativo |
|-------------------------------|--------------------|
| $\text{pH} < 5$ | Fuertemente ácido |
| $5 \leq \text{pH} < 6$ | Francamente ácido |
| $6 \leq \text{pH} < 6,6$ | Ligeramente ácido |
| $6,6 \leq \text{pH} \leq 7,3$ | Neutro |
| $7,3 < \text{pH} \leq 7,7$ | Ligeramente básico |
| $7,7 < \text{pH}$ | Básico |

Figura 6. Valores de pH en suelos (Porta et al., 2003).

Teniendo en cuenta la totalidad de las muestras se observa que la mayoría de los suelos son ligeramente básicos o básicos, a excepción de las muestras 11251 y 11252 de Guadalaviar que presentan valores francamente ácidos y las muestras 11257 de Denia y 11042 de la Sierra Perenchiza valores ligeramente ácido y normal respectivamente.

4.1.4. Conductividad eléctrica

Los resultados de los ensayos de conductividad eléctrica muestran un valor medio de 0,65 dS/m, con un mínimo de 0,06 dS/m en la muestra 11252 de Guadalaviar y un máximo de 1,95 dS/m en la muestra 11039 de la Sierra Perenchiza. Estas muestras coinciden con las de valores máximos y mínimos de pH y se debe a que las sales alcalinizan los suelos, por consiguiente, la muestra con mayor valor de pH coincide con la de mayor valor de conductividad eléctrica.

A continuación, se muestran en la tabla 3 los valores obtenidos en función del origen de las muestras:

Tabla 3. Valores de la CE según el origen de las muestras.

| Origen | Media (dS/m) | Valor mínimo (dS/m) | Valor máximo (dS/m) |
|-------------------|--------------|---------------------|---------------------|
| Alberique | 0,15 | 0,15 | 0,16 |
| Denia | 0,24 | 0,10 | 0,55 |
| Guadalaviar | 0,11 | 0,06 | 0,18 |
| Gilet | 0,14 | 0,12 | 0,16 |
| Sagunto | 0,25 | 0,19 | 0,29 |
| Serra | 0,85 | 0,09 | 1,64 |
| Sierra Perenchiza | 0,92 | 0,42 | 1,95 |

Como se puede observar en la tabla 3, las muestras de la Sierra Perenchiza, presentan valores de conductividad superiores al resto. Esto se debe a que la zona está caracterizada en su mayoría por suelos calizos y pH alcalino con altos niveles de carbonatos. Por el contrario, Guadalaviar obtiene los valores más bajos.

Para la valoración de los resultados se ha tenido en cuenta la clasificación de la salinidad de los suelos según la CE_{1:5} representada en la figura 7:

| CE _{1:5} dSm ⁻¹ | CE _p dSm ⁻¹ | Calificativo |
|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| < 0.35 | < 2 | No salino |
| 0.35 – 0.65 | 2 – 4 | Ligeramente salino |
| 0.65 – 1.15 | 4 – 8 | Salino |
| > 1.15 | > 8 | Muy salino |

Figura 7. Valores de la conductividad eléctrica en suelos (Saña et al., 1996).

Cabe mencionar que la presencia de iones en la solución del suelo, como pueden ser el calcio, sodio, magnesio, sulfato y cloruro, se debe principalmente a la meteorización de los minerales. Sin embargo, cuando las cantidades acumuladas son grandes, se han producido aportes de otros puntos de la zona.

4.1.6. Carbonatos

Respecto a los carbonatos, el valor medio obtenido es de 21,55 %, con un mínimo de 0,10 % correspondiente a la muestra 11251 de Guadalaviar con suelo ácido, y un máximo de 55,12% correspondiente a la muestra 11015 de la Sierra Perenchiza con suelo básico. La mayor presencia de carbonatos está relacionada con el pH del suelo. Los suelos con mayor cantidad de carbonatos presentan pH básicos, por ello las muestras anteriormente mencionadas presentan pH ácido y básico respectivamente. Estos datos se reflejan en la tabla 4 a continuación:

Tabla 4. Valores de los carbonatos según el origen de las muestras.

| Origen | Media (%) | Valor mínimo (%) | Valor máximo (%) |
|-------------------|-----------|------------------|------------------|
| Alberique | 10,06 | 6,12 | 14,00 |
| Denia | 1,04 | 0,25 | 2,49 |
| Guadalaviar | 3,19 | 0,10 | 11,17 |
| Gilet | 6,99 | 4,44 | 9,55 |
| Sagunto | 5,92 | 2,03 | 15,04 |
| Serra | 12,48 | 6,56 | 27,22 |
| Sierra Perenchiza | 38,06 | 1,59 | 55,12 |

La Sierra Perenchiza presenta el valor medio más alto, como era de esperar, ya que en su mayoría está constituida por suelos calcáreos básicos. Por otro lado, Denia presenta el valor medio más bajo, con pH mayoritariamente neutro y suelos constituidos por coluviones en parcelas agrícolas abandonadas.

La valoración de los resultados se ha realizado según los criterios recogidos en la figura 8 que se muestra a continuación.

| Porcentaje de Carbonatos | Calificativo |
|--------------------------|------------------|
| <15 | Correcta |
| 15-20 | Ligeramente alta |
| 20-45 | Alta |
| >45 | Muy alta |

Figura 8. Valores de los carbonatos en suelos (Soriano, 2017)

En líneas generales se observa que los niveles de carbonatos que se han obtenido son correctos. Sin embargo, la Sierra Perenchiza muestra valores altos respecto a las demás muestras.

Un suelo es calizo a partir de un 10 % de contenido en carbonatos, existiendo exceso de caliza cuando el valor supera el 20 % (Yanez, 1989). De acuerdo con los valores de carbonato cálcico en las diferentes muestras, se puede observar que las muestras correspondientes a Guadalaviar y Denia presentan valores inferiores al 10 %. Esto nos indica que se trata de suelos poco calcáreos. Al contrario, las muestras de la Sierra Perenchiza y Serra si presentan valores superiores al 10%, por lo que nos encontramos con suelos calcáreos. Este tipo de suelos suele ser común en zonas áridas y semiáridas, donde el nivel elevado de CaCO_3 puede generar una disminución en la disponibilidad de micronutrientes y metales pesados, como el Plomo y Boro y deficiencia de elementos como Cobre, Cobalto, Hierro y Zinc. Esto afecta directamente a las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, originando una disminución del rendimiento de la producción. (Porta et al., 2003)

4.2. Estudio de los parámetros del suelo según los factores ambientales

En este apartado se estudian las diferentes variables analizadas en el apartado anterior respecto a los factores de localización, tipo de vegetación, material geológico, superficie quemada o no quemada y suelo pastoreado o no pastoreado.

Se han tenido en cuenta aquellas relaciones estadísticamente significativas, descartando las no significativas. A continuación, se muestran las relaciones significativas:

4.2.1. Localización

Se ha observado una relación estadísticamente significativa entre la localización y las variables de porcentaje de arcilla y pH.

Localización y porcentaje de arcilla

Como se puede observar en la figura 9, existen diferencias significativas entre el porcentaje de arcilla de las muestras de la Sierra Perenchiza respecto a Serra, Denia, Guadalaviar, Gilet y Sagunto. Esto se debe a que la Sierra Perenchiza presenta suelos con textura mayoritariamente franco arcillo arenosa, con porcentajes de arcilla relativamente altos. El resto de las localizaciones presentan suelos con una mayor variedad de texturas.

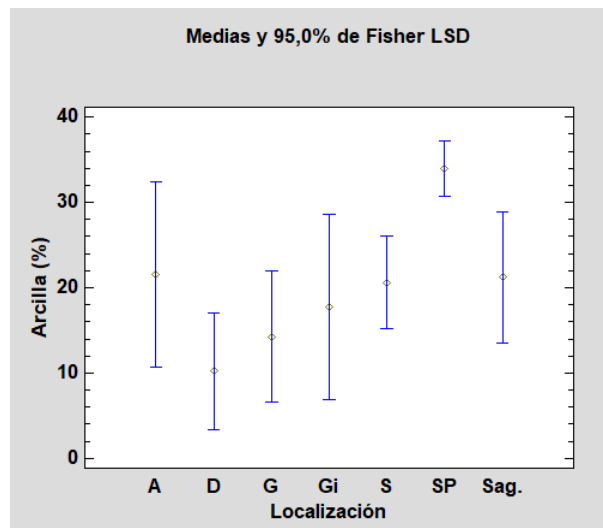


Figura 9. Gráfico de medias del porcentaje de arcillas según la localización.

A: Alberique, D: Denia, G: Guadalaviar, Gi: Gilet, S: Serra, SP: Sierra Perenchiza, Sag.: Sagunto

Localización y pH

En la figura 10, se observa una diferencia significativa entre Alberique, la Sierra Perenchiza, Denia y Guadalaviar, siendo más acentuada la diferencia de Denia y Guadalaviar entre el resto de las localizaciones. Esto se debe a que Denia y Guadalaviar presentan suelos ácidos en su mayoría, que contrastan con el resto de las localizaciones con suelos básicos característicos del este del mediterráneo.

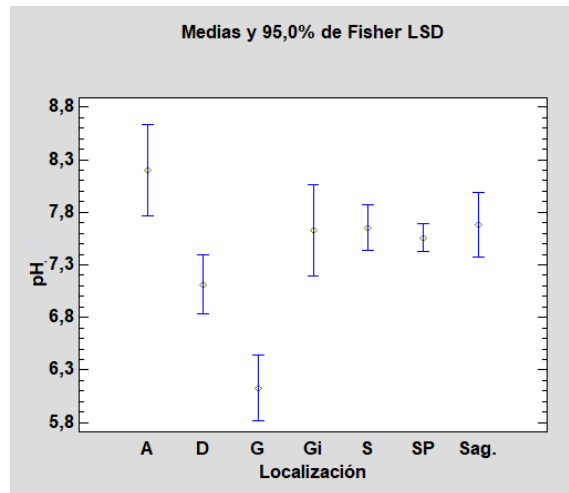


Figura 10. Gráfico de medias del pH según la localización.

A: Alberique, D: Denia, G: Guadalaviar, Gi: Gilet, S: Serra, SP: Sierra Perenchiza, Sag.: Sagunto

4.2.2. Tipo de vegetación

Se ha observado una relación estadísticamente significativa entre el tipo de vegetación y las variables de porcentaje de carbonatos y pH.

Tipo de vegetación y porcentaje de carbonatos

Como se puede observar en la figura 11, existe una diferencia significativa entre las medias de porcentaje de carbonatos en zonas de matorral mediterráneo y pino halepensis respecto a las parcelas abandonadas con vegetación herbácea, pino albar, sabinas y enebros y las zonas agrícolas. En este caso, las muestras correspondientes a zonas de matorral mediterráneo y pino halepensis, que son la mayoría, corresponden en su gran mayoría con suelos calcáreos. En este tipo de suelos, característicos de zonas áridas y semiáridas, es frecuente encontrar vegetación esclerófila y pinos como el carrasco, que se adapta mejor a las condiciones climáticas y edáficas del lugar. Por todo ello, era previsible obtener esta relación entre la vegetación y el porcentaje de carbonatos.

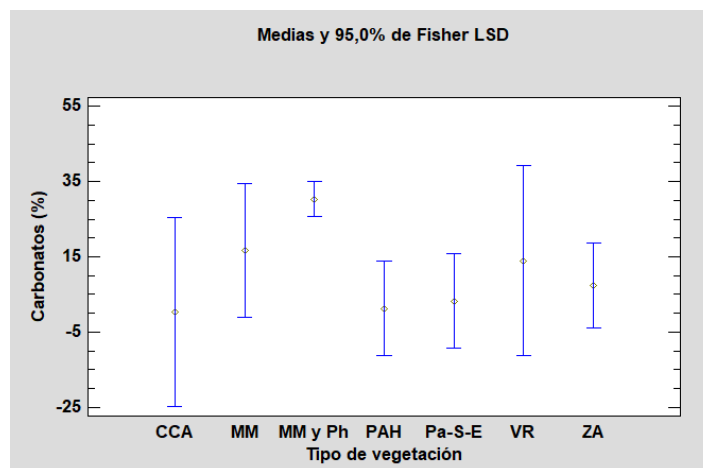


Figura 11. Gráfico de medias del porcentaje de carbonatos según el tipo de vegetación.

CCA: Campo de cultivo abandonado, MM: Matorral mediterráneo, MM Y Ph: Matorral mediterráneo y pino halepensis, PAH: Parcela abandonada con vegetación herbácea, Pa-S-E: Pino albar, sabinas y enebros, VR: Vegetación de ribera, ZA: antigua zona agrícola de mandarinos

Tipo de vegetación y pH

En la figura 12 se observa que existen diferencias significativas entre el pH de la mayor parte de los tipos de vegetación. En este caso, debido a que el tipo de vegetación está estrechamente relacionado con la localización de la muestra, se deduce que esta relación depende en mayor medida de la localización que el tipo de vegetación. Se observa que la zona de campo de cultivo abandonado y la zona de pino albar, sabinas y enebros, corresponde con las zonas más ácidas de Denia y Guadalaviar, mientras que las zonas de matorrales mediterráneos, pino halepensis, vegetación de ribera y agrícolas abandonadas corresponden con suelos más básicos de las zonas de la Sierra Perenchiza, Serra, Sagunto y Gilet.

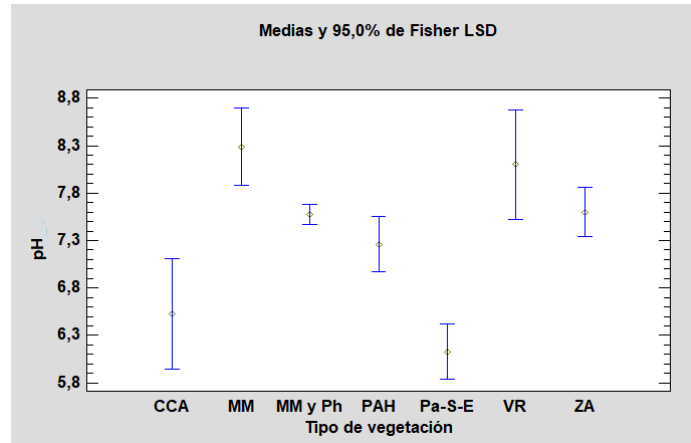


Figura 12. Gráfico de medias del pH según el tipo de vegetación.

CCA: Campo de cultivo abandonado, MM: Matorral mediterráneo, MM Y Ph: Matorral mediterráneo y pino halepensis, PAH: Parcela abandonada con vegetación herbácea, Pa-S-E: Pino albar, sabinas y enebros, VR: Vegetación de ribera, ZA: antigua zona agrícola de mandarinos

4.2.3. Material geológico

Se ha observado una relación estadísticamente significativa entre el material geológico y las variables de porcentaje de arcilla y pH.

Material geológico y porcentaje de arcilla

Tal como se muestra en la figura 13, existen diferencias significativas entre los porcentajes de arcilla en calizas, calizas y dolomías, margas y margocalizas, y calizas y dolomías principalmente. Las muestras correspondientes a calizas y dolomías y margas y margocalizas pertenecen en su gran mayoría a la Sierra Perenchiza, que a su vez presentan una mayor cantidad de muestras con suelos franco arcillo arenosos, por ello presentan un mayor porcentaje de arcillas a diferencia del resto. La media del porcentaje de arcilla con materiales de coluvión presenta diferencias significativas respecto a la caliza, las calizas y dolomías y las margas y margocalizas. En este caso, los suelos de coluvión corresponden a Guadalaviar y Denia, que presentan texturas franco arenosas y arenas francas en su mayoría. Se observa por lo tanto que la textura y la localización de las muestras son de manera indirecta importantes en esta relación.

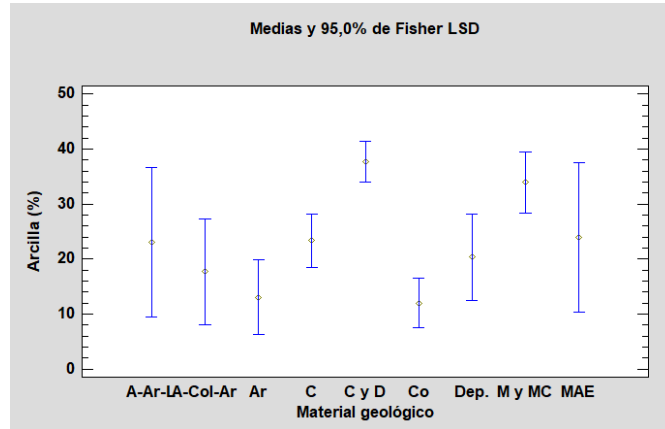


Figura 13. Gráfico de medias del porcentaje de arcilla según el material geológico.

A-Ar-L: Materiales de carácter aluvial, arenas y limos, A-Col-Ar: Aluvial, coluvial y arcillas con cantos, Ar: Arenisca, C: Caliza, C y D: Calizas y dolomías, Co: Coluviión, Dep.: Depósitos a pie de monte, M y MC: Margas y margocalizas, MAE: Mantos aluviales encostrados.

Material geológico y pH

En la figura 14, se reflejan las diferencias significativas existentes entre el material geológico y el pH.

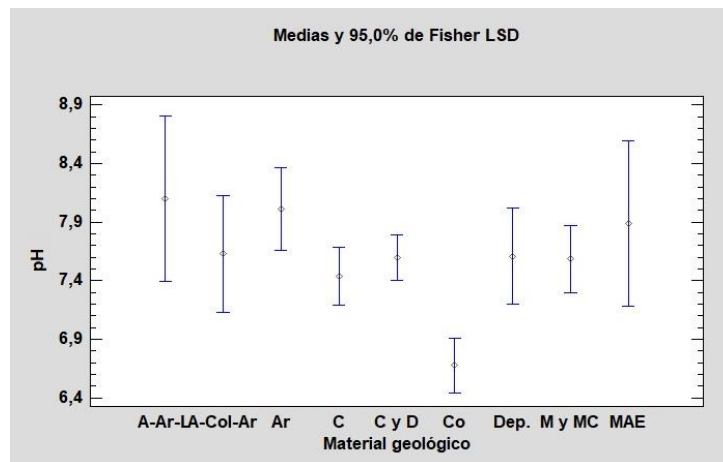


Figura 14. Gráfico de medias del pH según el material geológico.

A-Ar-L: Materiales de carácter aluvial, arenas y limos, A-Col-Ar: Aluvial, coluvial y arcillas con cantos, Ar: Arenisca, C: Caliza, C y D: Calizas y dolomías, Co: Coluviión, Dep.: Depósitos a pie de monte, M y MC: Margas y margocalizas, MAE: Mantos aluviales encostrados.

Los coluviones presentan diferencias significativas respecto al resto de los materiales geológicos en el pH. Estos materiales corresponden como se ha mencionado en el apartado anterior a las muestras de Guadalaviar y Denia que presentan suelos entre ácidos y neutros. El resto de las muestras, en líneas generales presentan suelos con pH básicos. Es por este motivo que hay diferencias significativas entre el pH de los coluviones y el del resto de materiales geológicos.

4.2.4. Superficie quemada/no quemada

Superficie quemada/no quemada y porcentaje de arcilla

Como se puede observar en la figura 15, existe una diferencia significativa entre el porcentaje de arcilla de los suelos no quemados respecto a los quemados. En este caso, los suelos con mayor porcentaje de arcilla son los quemados. Esto se debe a que la mayoría de las muestras

cuya superficie ha sido afectada por un incendio forestal provienen de la Sierra Perenchiza. En la Sierra Perenchiza la textura predominante es la franco arcillo arenosa, que por su naturaleza, presenta un porcentaje de arcillas mayor que las texturas de los otros lugares.

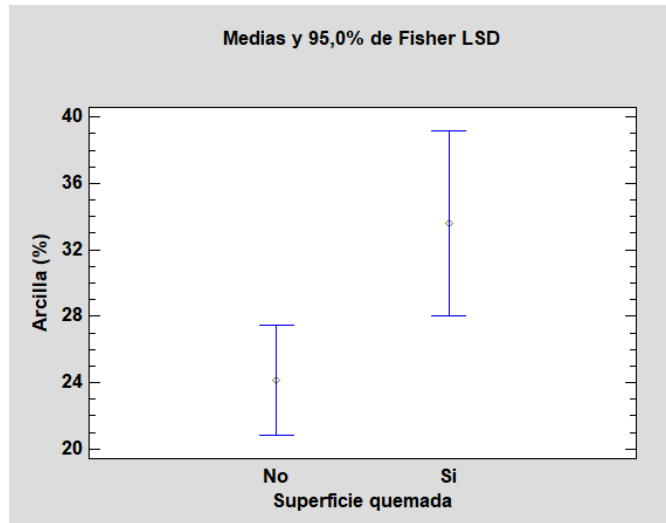


Figura 15. Gráfico de medias del porcentaje de arcillas según el tipo de superficie.

Superficie quemada/no quemada y carbonatos

La figura 16 muestra que hay diferencias significativas entre el porcentaje de carbonatos según si la superficie se ha quemado o no. En este caso sucede algo similar al apartado anterior, ya que los suelos que han sido afectados por incendios forestales corresponden a la Sierra Perenchiza y a Serra, ambos lugares con medias de porcentaje de carbonatos superior al resto de lugares.

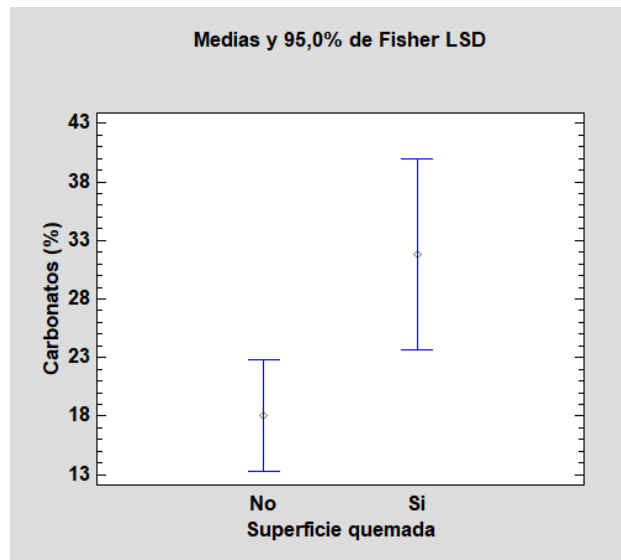


Figura 16. Gráfico de medias del porcentaje de carbonatos según el tipo de superficie.

Superficie quemada/no quemada y conductividad eléctrica

En el gráfico de la figura 17 se muestra que existen diferencias significativas entre la conductividad eléctrica para los distintos tipos de superficie, quemada y no quemada. Al igual

que los casos anteriores, la explicación se debe a que las muestras de suelo cuya superficie ha sido afectada por incendios forestales, pertenecen a la Sierra Perenchiza y Serra, ambas con suelos con valores de conductividad eléctrica superiores al resto (ver tabla 4).

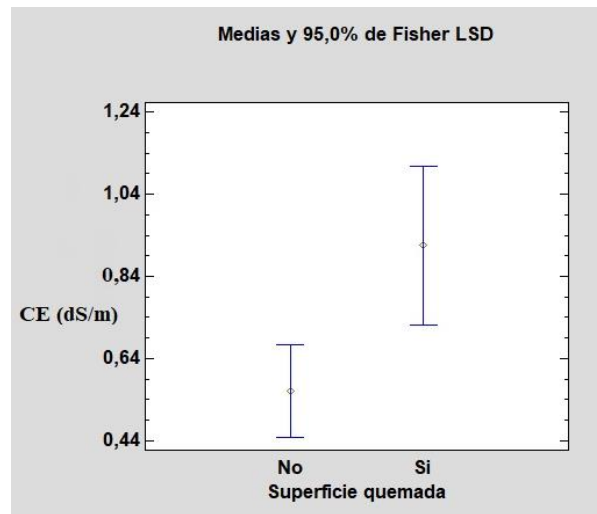


Figura 17. Gráfico de medias de la conductividad eléctrica según el tipo de superficie.

4.2.5. Suelo pastoreado/no pastoreado

Para este factor no se han encontrado diferencias significativas en ningún parámetro del suelo.

4.3. Estudio de la estabilidad de los agregados

En primer lugar, cabe mencionar que las muestras 11536, 11039, 11040, 12728 y 12729, no se han tenido en cuenta en el estudio de estabilidad de agregados ya que presentan porcentajes de materia orgánica superiores a 40%. Estos valores tan elevados indican que estas muestras pertenecen al mantillo forestal, es decir, la materia orgánica no pertenece al suelo y por lo tanto no pueden tener agregados.

Los resultados obtenidos en los ensayos de estabilidad de agregados se muestran en la tabla 1 del Anexo I.

En la tabla 5 que se muestra a continuación se describen los valores medios, mínimos y máximos de la estabilidad de los agregados a las diferentes temperaturas:

Tabla 5. Valores de la estabilidad de los agregados a diferentes temperaturas.

| | Media (%) | Valor mínimo (%) | Valor máximo (%) |
|---|-----------|------------------|------------------|
| Estabilidad de agregados en condiciones naturales | 66,31 | 41,47 | 85,25 |
| Estabilidad de agregados a 450°C | 50,03 | 14,42 | 77,36 |
| Estabilidad de agregados a 700°C | 52,48 | 13,25 | 80,37 |

Como se puede observar, la media de estabilidad de agregados es superior en condiciones naturales. Por otra parte, los valores mínimos de estabilidad de los agregados se han visto reducidos considerablemente en las muestras sometidas a altas temperaturas. Los valores máximos también se han visto reducidos, pero en menor medida.

Los valores obtenidos se han clasificado en función de su estructura como se muestra en figura (figura18):

| Textura | EA (%) | Clasificación |
|-----------|---------|---------------|
| Arcillosa | > 90 | Alta |
| | 70 - 90 | Regular |
| | < 70 | Baja |
| Franca | > 60 | Alta |
| | 40 - 60 | Regular |
| | < 40 | Baja |
| Arenosa | > 20 | Alta |
| | 10 - 20 | Regular |
| | < 10 | Baja |

Figura 18. Valores de la estabilidad de agregados según la textura.

En líneas generales se observa que la estabilidad de los agregados de las muestras no sometidas a altas temperaturas en mufla presenta valores altos, en concreto 23 de las 42 muestras presentan valores altos, 4 de 42 bajos y 15 de 42 valores regulares, lo que representa el 54,7%, 9,5% y 35,7% del total de las muestras respectivamente. Respecto a la estabilidad de los agregados de las muestras sometidas a 450°C, se observa una disminución en el número de muestras con valores altos, con 14 de 42 valores altos (33,3%), 18 de 42 bajos (42,8%) y 10 de 42 con valores regulares (23,8%). Por último, los valores de estabilidad de las muestras sometidas a 700°C presentan 19 de 42 muestras con valores altos (45,2%), 17 de 42 bajos (40,5%) y 6 con valores regulares (14,3%).

Para conocer si las diferencias entre los valores de estabilidad de agregados entre las distintas temperaturas son significativas, se ha realizado un análisis estadístico de comparación de medias.

Como se puede observar en la figura 19 se ha obtenido una diferencia notable entre la estabilidad de agregados de las muestras no introducidas en mufla y las sometidas a altas temperaturas, siendo los valores de estas últimas inferiores.

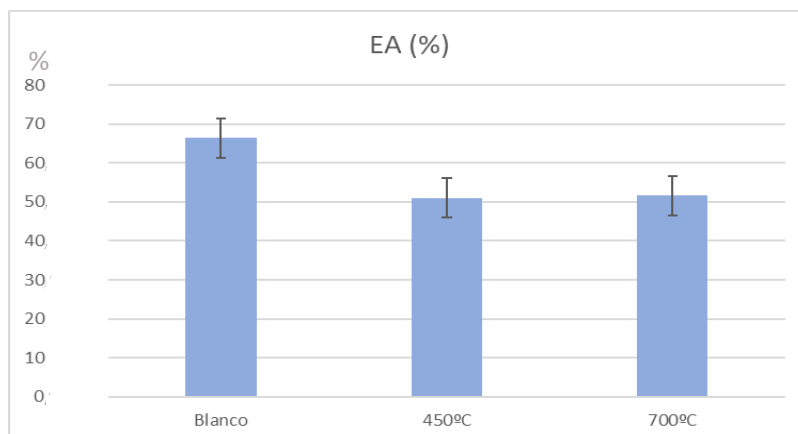


Figura 19. Gráfico de comparación de medias de la estabilidad de los agregados a distintas temperaturas.

El análisis estadístico de los datos muestra que existen diferencias significativas entre la estabilidad de agregados de las muestras sometidas a altas temperaturas respecto a las no sometidas a ella. Esto se debe principalmente a la pérdida de materia orgánica producida por las altas temperaturas de calcinación. Sin embargo, no se encuentran diferencias significativas entre las medias de las muestras sometidas a 450°C respecto a las sometidas a 700°C.

A pesar de que no hay diferencias estadísticamente significativas, se observa que a 700°C la media de la estabilidad de los agregados es ligeramente superior que a 450°C (tabla 6). Esto podría deberse a la presencia de sustancias hidrofóbicas generadas durante la combustión que puede producir un aumento de la estabilidad de agregados, ya que actúan como una fina película que rodea parcial o totalmente el agregado, y por tanto, actúan también como cementantes (Arcenegui et al., 2008).

4.3.1. Estabilidad de los agregados vs parámetros del suelo

En este apartado se exponen los resultados obtenidos en los análisis estadísticos de los datos y se dan a conocer las relaciones estadísticamente significativas existentes entre la estabilidad de los agregados y otros parámetros edáficos.

La materia orgánica es el parámetro más influyente en la estabilidad de los agregados, constituye un papel importante en su formación ya que produce quelantes con los metales que ayudan a la formación de agregados (Arcenegui, 2011). Por ello, se va a representar la relación entre esta variable y la estabilidad de los agregados en función del factor localización, a pesar de que no hay una relación estadísticamente significativa entre ellas. Con ello se pretende conocer con mayor exactitud cuáles son las diferencias según el lugar de procedencia de las muestras.

Como se puede observar en la figura 20, la dispersión de los datos dificulta la obtención de líneas de tendencia que se ajusten correctamente. Además, existe una variabilidad de datos elevada para cada localización.

Se puede observar que, en Sagunto, ligeras variaciones en la cantidad de la materia orgánica suponen grandes variaciones en la estabilidad de los agregados (véase la pendiente de la línea de tendencia de Sagunto).

Serra, Guadalaviar y Denia muestran líneas de tendencia negativas, lo que supone una disminución en la estabilidad de los agregados a mayor cantidad de materia orgánica. Es posible que esto ocurra en los casos en los que la materia orgánica presente en el suelo está parcialmente sin descomponer y no da lugar a procesos de agregación.

Por último, Gilet, la Sierra Perenchiza y Alberique presentan una línea de tendencia positiva con pendiente ligera que indica que la variación de la materia orgánica supone un cambio menos brusco en la estabilidad de los agregados.

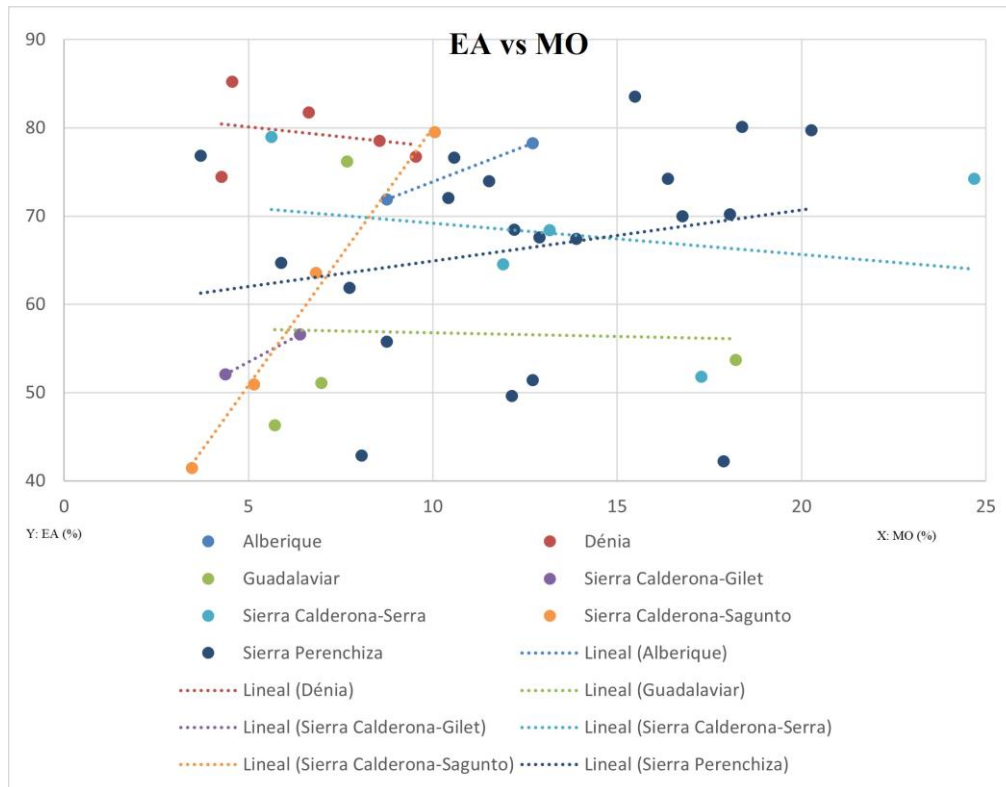


Figura 20. Gráfico de dispersión de la estabilidad de los agregados frente a la materia orgánica.

En los siguientes apartados se exponen las relaciones significativas existentes entre la estabilidad de los agregados y los diferentes parámetros del suelo.

4.3.1.1. Estabilidad de los agregados del suelo en condiciones naturales

En el caso de la estabilidad de los agregados en condiciones naturales, no se han obtenido relaciones significativas con ningún parámetro del suelo.

No obstante, si se estudia en las distintas localizaciones en concreto, se observa una relación significativa entre la estabilidad de los agregados y otros parámetros del suelo en Sagunto. A continuación, se describen dichas relaciones.

Estabilidad de los agregados del suelo en condiciones naturales y materia orgánica en Sagunto

Según los resultados obtenidos, existe una relación significativa entre la estabilidad de los agregados y la materia orgánica para esta localización.

La materia orgánica está estrechamente relacionada con la estabilidad de los agregados. Como se ha comentado anteriormente esta mantiene las partículas del suelo unidas favoreciendo la agregación. Por ello, la relación entre las variables es positiva.

En la figura 21 se puede observar la relación existente entre las dos variables:

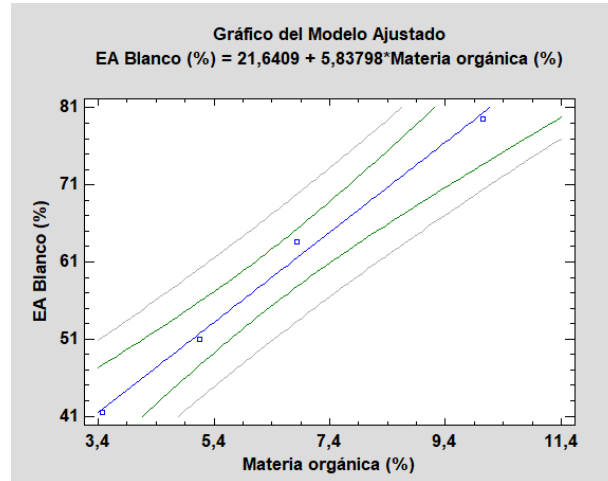


Figura 21. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados en condiciones naturales y materia orgánica.

La ecuación de correlación correspondiente al modelo que mejor se ajusta a los datos es la siguiente:

$$EA\ Blanco\ (\%) = 21.6409 + 5.83798 \cdot materia\ orgánica\ (\%)$$

4.3.1.2. Estabilidad de los agregados del suelo a 450°C

En el caso de la estabilidad de los agregados a 450°C se han encontrado relaciones significativas entre las siguientes variables.

Estabilidad de los agregados a 450°C y porcentaje de arcilla

Se ha observado una relación significativa entre la estabilidad de los agregados a 450°C y el porcentaje de arcilla de la muestra.

Las arcillas, igual que la materia orgánica, son elementos cementantes en la agregación de las partículas del suelo. Esta favorece la estabilidad estructural del suelo, siempre y cuando no se encuentren elementos defloculantes como el sodio en el complejo de cambio. Las uniones se pueden dar entre partículas de arcillas, entre arcillas y otros minerales, entre la materia orgánica. (Dilmar, 2016)

Por otra parte, se han realizado numerosos estudios sobre el efecto que tiene el calentamiento de las arcillas y en todos ellos se ha observado una disminución de sus propiedades resistentes. Entre estas propiedades, la cohesión es una de las principales afectadas por las altas temperaturas.

La relación existente entre la estabilidad de los agregados y el porcentaje de arcillas, como se puede observar en la figura 22, es negativa. La explicación puede deberse a que las altas temperaturas han alterado las propiedades de las arcillas, disminuyendo por consiguiente la estabilidad de los agregados. Las muestras que no han sido sometidas a altas temperaturas mantienen las arcillas con sus propiedades cementantes intactas. Sin embargo, las arcillas en las muestras sometidas a 450°C han perdido dichas propiedades, por lo tanto, la proporción de suelo correspondiente a estas, en este caso, viene dada por un material relativamente inestable.

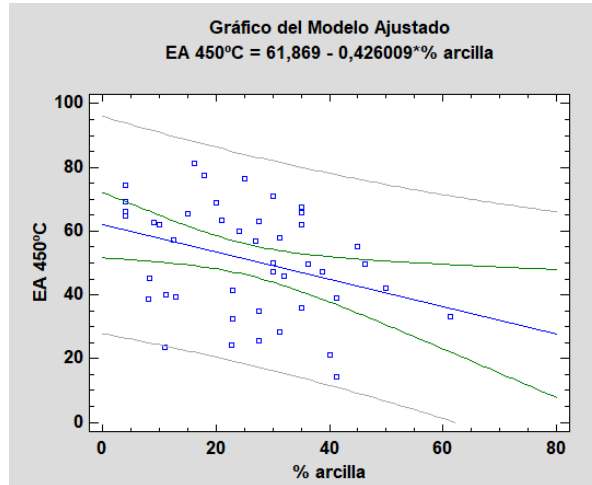


Figura 22. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 450°C y porcentaje de arcillas.

La ecuación de correlación correspondiente al modelo que mejor se ajusta a los datos es la siguiente:

$$EA_{450^{\circ}C} = 61.869 - 0.426009 \cdot \% \text{ arcilla}$$

Estabilidad de los agregados a 450°C y porcentaje de carbonatos

Los resultados han mostrado que hay una relación significativa entre la estabilidad de los agregados a 450°C y el porcentaje de carbonatos. Al igual que en el caso anterior, la relación es negativa.

Los carbonatos, como se ha comentado anteriormente tienen una acción positiva sobre la estructura del suelo y su acumulación contribuye a la cementación de las partículas.

A altas temperaturas los carbonatos son inestables y pierden dióxido de carbono mientras se transforman en óxidos. Es por este motivo, que se observa una relación negativa entre la cantidad de carbonatos presentes en la muestra y la estabilidad de los agregados a altas temperaturas, ya que los carbonatos tras ser sometidos a temperaturas elevadas han sido descompuestos y por consiguiente han perdido sus propiedades favorecedoras de la agregación.

En la figura 23 se muestra la relación entre las variables mencionadas y la ecuación de correlación que mejor se ajusta en este caso a los datos:

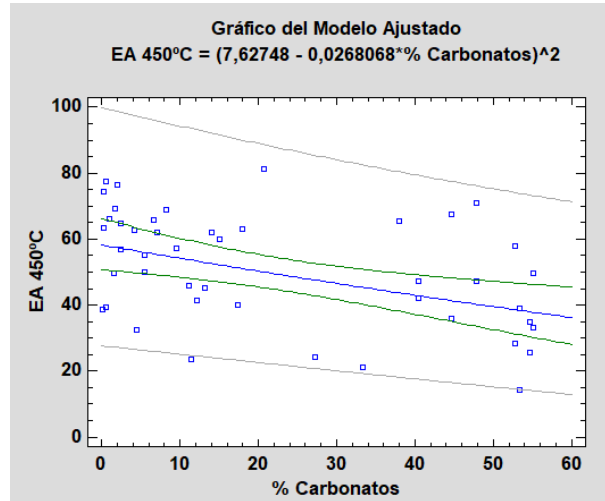


Figura 23. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 450°C y porcentaje de carbonatos. La ecuación de correlación correspondiente al modelo que mejor se ajusta a los datos es la siguiente:

$$EA\ 450^{\circ}C = (7.62748 - 0.0268068 \cdot \% \text{ carbonatos})^2$$

Si se estudia la estabilidad de agregados en las distintas localizaciones en concreto, se observa una relación significativa entre la estabilidad de los agregados y otros parámetros del suelo en Serra y Guadalaviar. A continuación, se describen dichas relaciones.

Estabilidad de los agregados del suelo a 450°C y pH en Serra

El pH es un parámetro que se encuentra estrechamente relacionado con los carbonatos. A mayor cantidad de carbonatos, mayor pH presentará un suelo. A su vez, los carbonatos junto con la materia orgánica actúan como agente cementante de las partículas del suelo favoreciendo la agregación. En este caso, la relación existente entre la estabilidad de los agregados a 450°C y el pH es negativa (figura 24). Esto se debe a que las propiedades favorecedoras de la agregación de los carbonatos se han visto afectadas por las altas temperaturas, quedando alterada su composición.

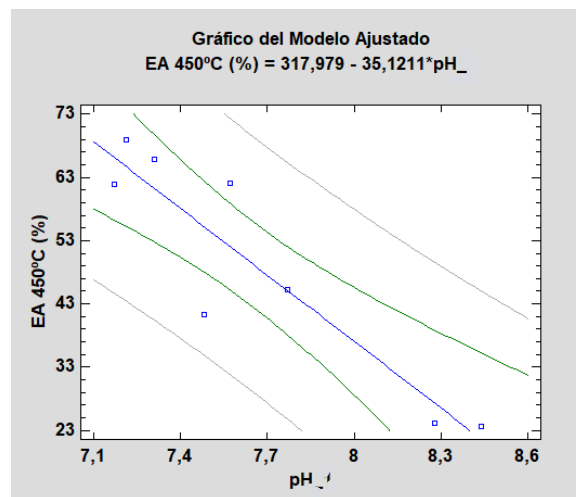


Figura 24. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 450°C y pH en Serra. La ecuación de correlación correspondiente al modelo que mejor se ajusta a los datos es la siguiente:

$$EA\ 450^{\circ}C = 317.979 - 35.1211 \cdot pH$$

Estabilidad de los agregados del suelo a 450°C y materia orgánica en Guadalaviar

Se ha observado una relación significativa entre la cantidad de materia orgánica y la estabilidad de los agregados a 450°C. Anteriormente se ha comentado la relación que tiene la materia orgánica con la formación de agregados estables, por lo que se muestran directamente en la figura 25 los datos correspondientes a la correlación.

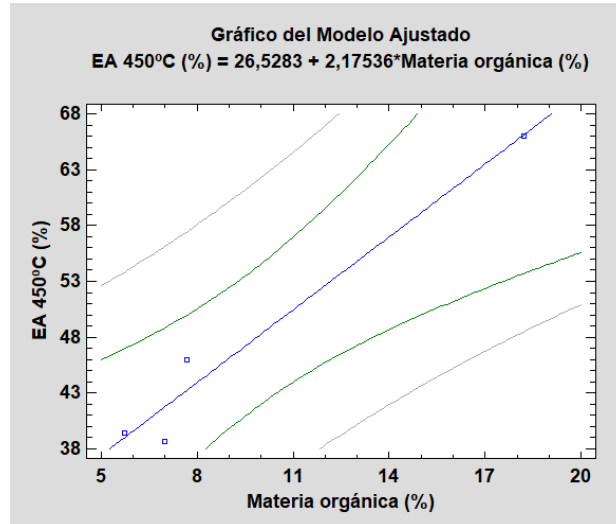


Figura 25. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 450°C y materia orgánica en Guadalaviar.

La ecuación de correlación correspondiente al modelo que mejor se ajusta a los datos es la siguiente:

$$EA\ 450^{\circ}C = 26.5283 + 2.17536 \cdot \% \text{ materia orgánica}$$

4.3.1.3. Estabilidad de los agregados del suelo a 700°C

Para la estabilidad de los agregados del suelo a 700°C se han obtenido las siguientes relaciones estadísticamente significativas.

Estabilidad de los agregados a 700°C y porcentaje de carbonatos

En cuanto a la estabilidad de los agregados a 700°C, también se ha observado una relación significativa negativa con el porcentaje de carbonatos.

En la figura 26 se muestra la relación entre las variables mencionadas:

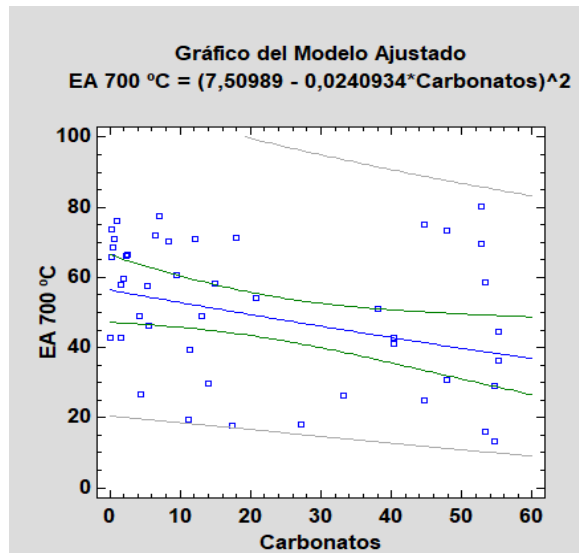


Figura 26. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 700°C y porcentaje de carbonatos.

La justificación de estos resultados es la descrita en el apartado anterior de estabilidad de agregados a 450°C, en este caso a una temperatura mayor.

La ecuación de correlación correspondiente al modelo que mejor se ajusta a los datos es la siguiente:

$$EA\ 700^\circ C = (7.50989 - 0.0240934 \cdot \% \text{ carbonatos})^2$$

Estabilidad de los agregados a 700°C y pH

Según los resultados obtenidos, existe una relación negativa significativa entre la estabilidad de los agregados a 700°C y el pH.

El pH es un parámetro que se relaciona con el contenido de carbonatos en suelos. Cuando el pH disminuye, se produce la disolución de los carbonatos, mientras que un aumento del pH produce su precipitación. Por otra parte, cabe mencionar que los suelos alcalinos se caracterizan por la presencia de carbonatos y como se ha explicado anteriormente, los carbonatos tienen un efecto positivo en la estabilidad de los agregados. Teniendo en cuenta esto y que la mayoría de las muestras analizadas tienen valores de pH superiores a 7, se puede explicar la relación negativa entre el pH y la estabilidad de los agregados a 700°C, ya que a altas temperaturas los carbonatos se descomponen y se pierden sus propiedades favorecedoras para la agregación.

En la figura 27 se puede observar la relación existente entre las dos variables:

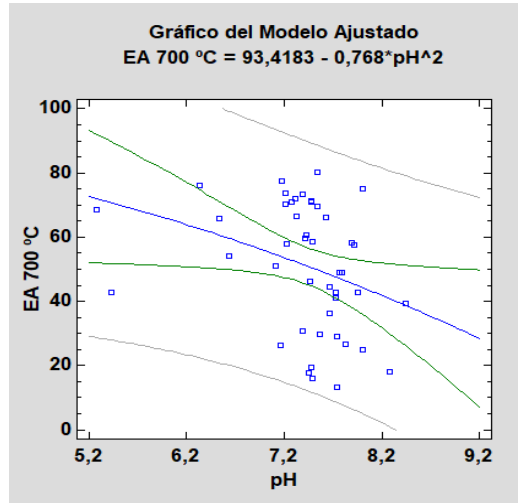


Figura 27. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 700°C y pH.

La ecuación de correlación correspondiente al modelo que mejor se ajusta a los datos es la siguiente:

$$EA\ 700^{\circ}C = 93.4183 - 0.768 \cdot pH^2$$

Si se estudia la estabilidad de agregados en las distintas localizaciones en concreto, se observa una relación significativa entre la estabilidad de los agregados y otros parámetros del suelo en Serra. A continuación, se describen dichas relaciones.

Estabilidad de los agregados del suelo a 700°C y pH en Serra

En el caso concreto de Serra, se ha obtenido una relación significativa entre el pH y la estabilidad de los agregados a 700°C. La relación existente entre estas variables a nivel teórico se ha definido en los apartados anteriores, por lo tanto, se muestran directamente los datos de la correlación en la figura 28 a continuación:

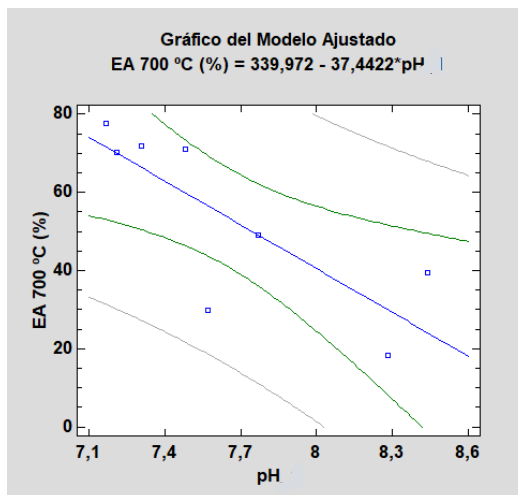


Figura 28. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 700°C y pH en Serra.

La ecuación de correlación correspondiente al modelo que mejor se ajusta a los datos es la siguiente:

$$EA\ 700^{\circ}C = 339.972 - 37.4422 \cdot pH$$

Estabilidad de los agregados del suelo a 700°C y carbonatos en Serra

Las muestras de Serra han mostrado una relación estadísticamente significativa entre la cantidad de carbonatos y la estabilidad de los agregados a 700°C. Como en casos anteriores, la relación entre estas variables es negativa. Los datos estadísticos de esta correlación se muestran a continuación en la figura 29:

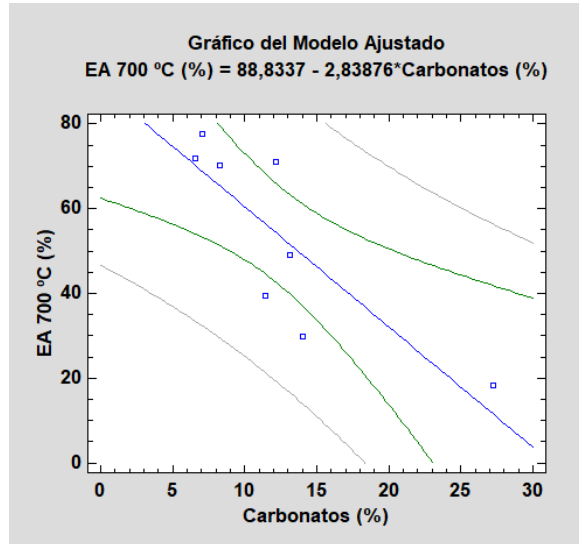


Figura 29. Gráfico del modelo de relación estabilidad de agregados a 700°C y carbonatos en Serra.

La ecuación de correlación correspondiente al modelo que mejor se ajusta a los datos es la siguiente:

$$EA\ 700^{\circ}C = 88.8337 - 2.83876 \cdot \% \text{ carbonatos}$$

4.3.2. Estabilidad de los agregados vs factores ambientales

En este apartado se van a describir las diferencias significativas existentes entre la estabilidad de los agregados a diferentes temperaturas respecto a los factores localización, tipo de vegetación, material geológico, superficie quemada/no quemada y zona pastoreada/no pastoreada.

Estabilidad de los agregados y localización

Como era de esperar, en función del origen de las muestras, los valores de la estabilidad de los agregados varían. Esto es debido principalmente a las diferencias existentes entre el tipo de manejo del suelo y los parámetros edáficos según el lugar de muestreo.

Como se puede observar en la figura 30, las muestras provenientes de Denia y Alberique presentan mayor estabilidad de agregados a 700°C y en condiciones naturales, mientras que a 450°C las muestras de Denia y la Sagunto son las que obtienen valores mayores en la estabilidad. En condiciones naturales y a 700°C, las muestras correspondientes a Gilet presentan los valores más bajos de estabilidad de agregados, mientras que a 450°C el menor valor corresponde con Serra.

Se puede observar también que existen diferencias significativas entre la estabilidad de agregados en condiciones naturales de Denia con Guadalaviar y Gilet. Además, la estabilidad de los agregados en condiciones normales en Alberique también presenta diferencias significativas respecto a Guadalaviar y Gilet. En cuanto a Denia, la característica principal de las muestras de esta localización que las distingue del resto es el manejo o uso del suelo, que corresponde con parcelas abandonadas con vegetación herbácea. En Alberique el parámetro

distintivo respecto al resto de las localizaciones es el pH, presentando los suelos más básicos de todas las muestras.

Respecto a la estabilidad de los agregados a 450°C se observa una diferencia estadísticamente significativa entre Denia con Alberique y Guadalaviar.

A 700°C no se observan diferencias características entre las localizaciones.

Por último, cabe mencionar que para casi todas las localizaciones la estabilidad de agregados disminuye al someterse a altas temperaturas a excepción de Sagunto experimenta un aumento.

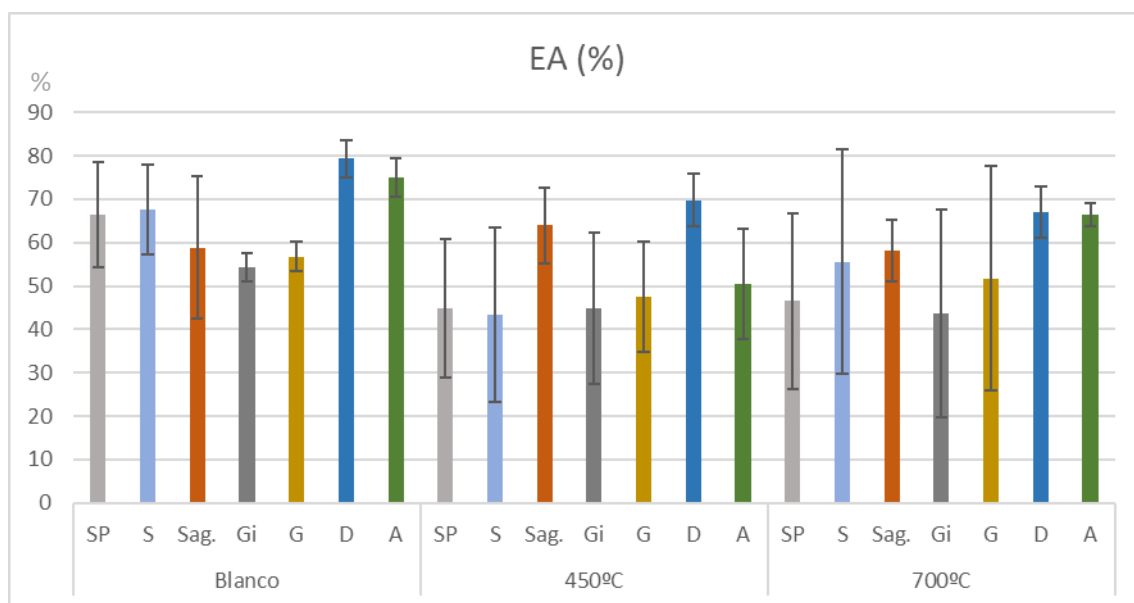


Figura 30. Gráfico de medias de la estabilidad de los agregados en función de la localización.
 A: Alberique, D: Denia, G: Guadalaviar, Gi: Gilet, S: Serra, SP: Sierra Perenchiza, Sag.: Sagunto

Estabilidad de los agregados y tipo de vegetación

El tipo de vegetación nos describe en gran parte el uso del suelo de las diferentes zonas. Según este factor es de esperar obtener diferencias significativas que reflejen los efectos que tiene el tipo de vegetación en la estabilidad de los agregados del suelo.

En la figura 31 se observa que a 450°C y 700°C la estabilidad de los agregados es superior en las parcelas abandonadas con vegetación herbácea. Sin embargo, la estabilidad de los agregados en condiciones naturales es superior en los campos de cultivo abandonados. Esto puede deberse al uso de fertilizantes y otros productos agrícolas previo al abandono de estas parcelas. En cuanto a los valores inferiores, a 450°C y 700°C se observa que el matorral mediterráneo presenta los valores más bajos de estabilidad. No obstante, en condiciones normales son las zonas agrícolas las que obtienen el menor valor.

Se observa también que en condiciones normales existen diferencias significativas entre la estabilidad de los agregados de las parcelas abandonadas con el pino albar, sabinas y enebros y las antiguas zonas agrícolas. En el caso de 450°C, la estabilidad de agregados de las parcelas abandonadas con vegetación herbácea también es significativamente diferente respecto al resto del tipo de vegetaciones a excepción de la antigua zona agrícola.

Por último, cabe mencionar que la estabilidad de los agregados disminuye al someterse a altas temperaturas en todos los tipos de vegetación a excepción de la zona agrícola, que como puede observarse en el gráfico, presenta valores muy similares a todas las temperaturas.

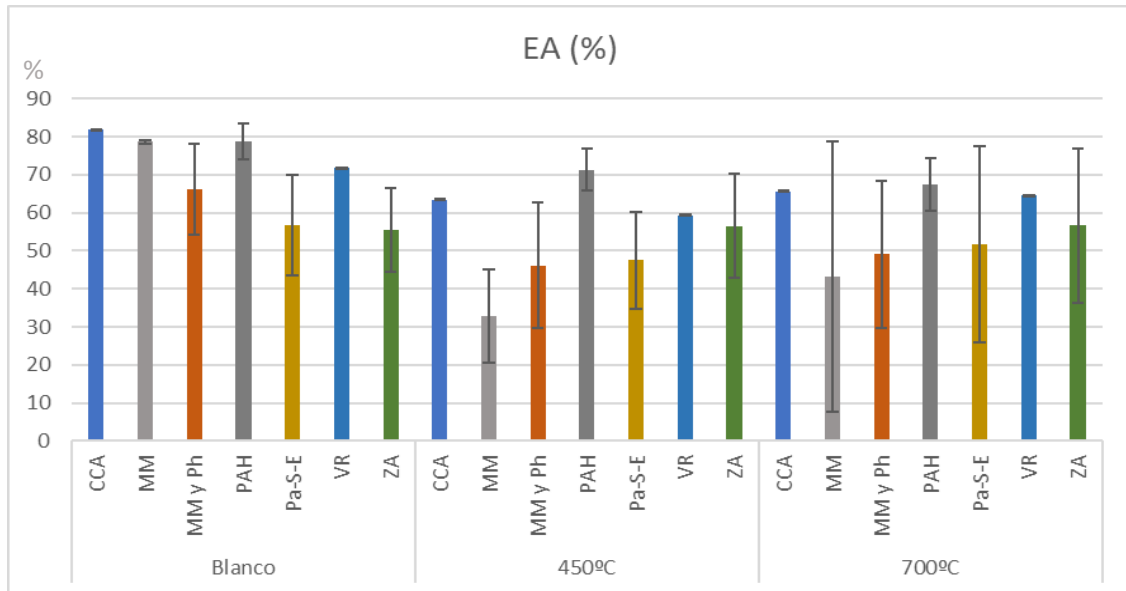


Figura 31. Gráfico de medias de la estabilidad de los agregados en función del tipo de vegetación.

CCA: Campo de cultivo abandonado, MM: Matorral mediterráneo, MM Y Ph: Matorral mediterráneo y pino halepensis, PAH: Parcela abandonada con vegetación herbácea, Pa-S-E: Pino albar, sabinas y enebros, VR: Vegetación de ribera, ZA: antigua zona agrícola de mandarinos

Estabilidad de los agregados y material geológico

Es fundamental conocer el material geológico de cada muestra, pues a partir de ellos y mediante los procesos formadores, se desarrollan los suelos.

Como se puede observar en la figura 32, los valores superiores de estabilidad de agregados en condiciones naturales y a 700°C son los correspondientes a las muestras de suelos calizos. Como se ha mencionado en apartados anteriores, los suelos calizos contienen en mayor o menor medida carbonatos, que contribuyen favorablemente a la estabilidad de los agregados. Por ello, no es extraño encontrarse con estos resultados. En cuanto a la estabilidad de los agregados a 450°C, los valores superiores corresponden con los coluviones y los depósitos a pie de monte. A 450°C y a 700°C la estabilidad de los agregados es menor en las areniscas y en condiciones normales el valor más bajo corresponde con los mantos aluviales encostrados.

Se distingue también que hay diferencias significativas entre la estabilidad de los agregados de los mantos aluviales encostrados en condiciones normales respecto al resto de materiales. A 450°C la estabilidad de los agregados de las areniscas presenta diferencias significativas con el resto de los materiales y a 700°C solo es significativa respecto a los materiales calizos, los depósitos de mantillo y los mantos aluviales encostrados.

La estabilidad de los agregados disminuye en todas las muestras al someterse a altas temperaturas a excepción de las muestras correspondientes a los mantos aluviales encostrados, que experimentan un aumento considerable.

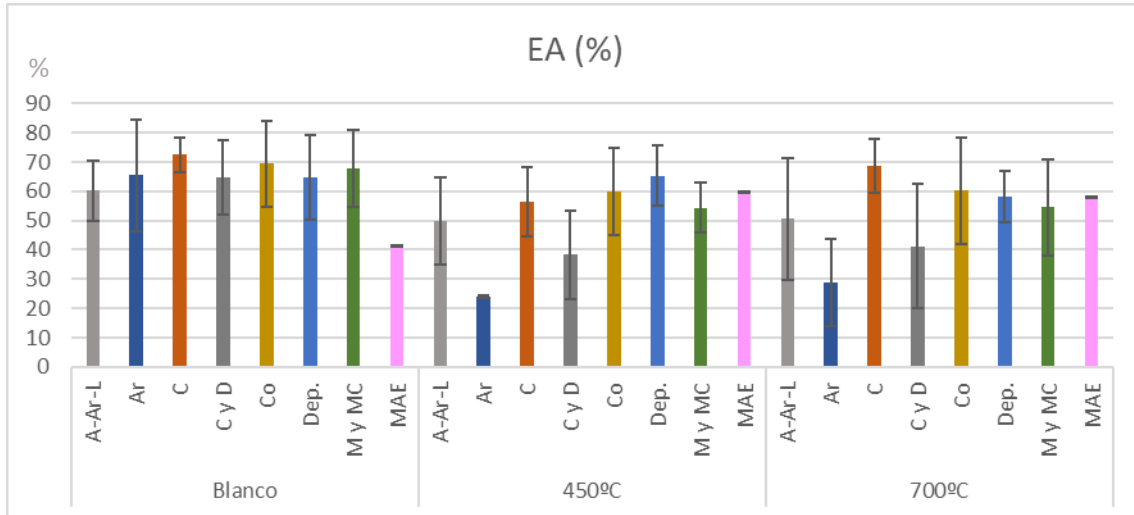


Figura 32. Gráfico de medias de la estabilidad de los agregados en función del material geológico.

A-Ar-L: Materiales de carácter aluvial, arenas y limos, A-Col-Ar: Aluvial, coluvial y arcillas con cantos, Ar: Arenisca, C: Caliza, C y D: Calizas y dolomías, Co: Coluvión, Dep.: Depósitos a pie de monte, M y MC: Margas y margocalizas, MAE: Mantos aluviales encostrados.

Estabilidad de agregados y superficie quemada/no quemada

La figura 33 muestra la gráfica que relaciona estabilidad de los agregados con el factor superficie quemada o no quemada.

Se observa una mayor estabilidad de agregados a 450°C y 700°C en las muestras cuya superficie no ha sido afectada por incendios forestales.

Considerando que los incendios forestales destruyen la materia orgánica, la vegetación y organismos del suelo y alteran los compuestos favorecedores de la agregación como los carbonatos, los agentes cementantes desaparecen, reduciendo así la estabilidad de los agregados, lo que explicaría los resultados obtenidos en los análisis estadísticos.

En el caso de la estabilidad de los agregados en condiciones naturales, las muestras con superficie quemada presentan un valor superior a las no quemadas.

Por último, cabe mencionar que solo se ha obtenido una diferencia significativa entre la estabilidad de los agregados con suelos con superficies quemadas a 450°C y suelos quemados en condiciones normales. Asimismo, se observa que la disminución de la estabilidad de los agregados que experimentan los suelos con superficie quemada al someterse a elevadas temperaturas es mayor que la que experimentan los suelos con superficie no quemada.

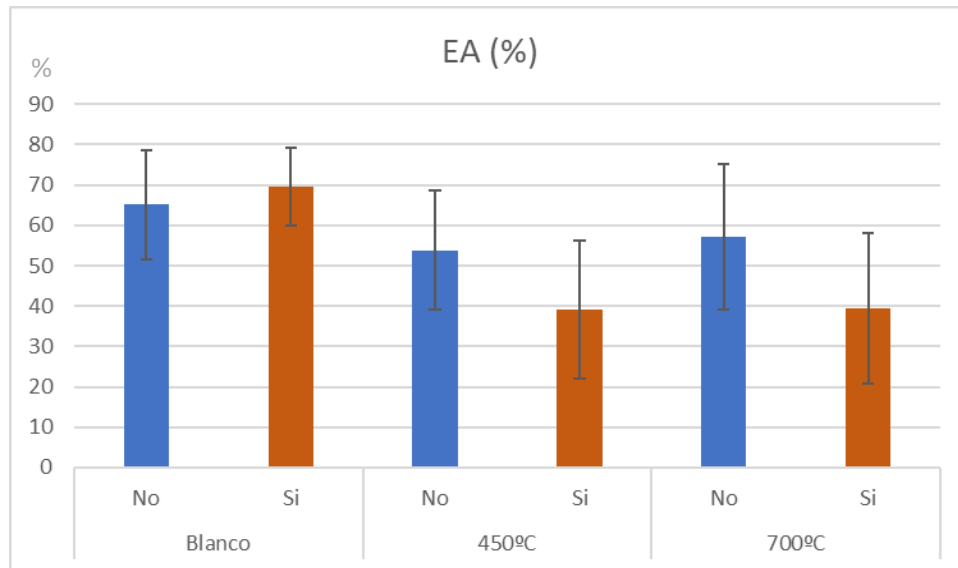


Figura 33. Gráfico de medias de la estabilidad de los agregados en función de la superficie quemada o no quemada.

Estabilidad de agregados y zona pastoreada/no pastoreada

El efecto del pisoteo de los animales compacta el suelo disminuyendo la porosidad de estos y el exceso de pastoreo puede ser perjudicial para el sistema radicular de las plantas. Por consiguiente, un pastoreo excesivo puede afectar negativamente a la estabilidad de los agregados. Por el contrario, si el pastoreo se gestiona correctamente, este puede ser favorecedor para los suelos y la vegetación, produciéndose una mejora en la formación de agregados del suelo.

En este caso, la figura 34 muestra que en todas las temperaturas la estabilidad de los agregados es ligeramente superior en los suelos pastoreados. Sin embargo, no existe ninguna diferencia significativa entre la estabilidad de los agregados y el factor zona pastoreada o no pastoreada.

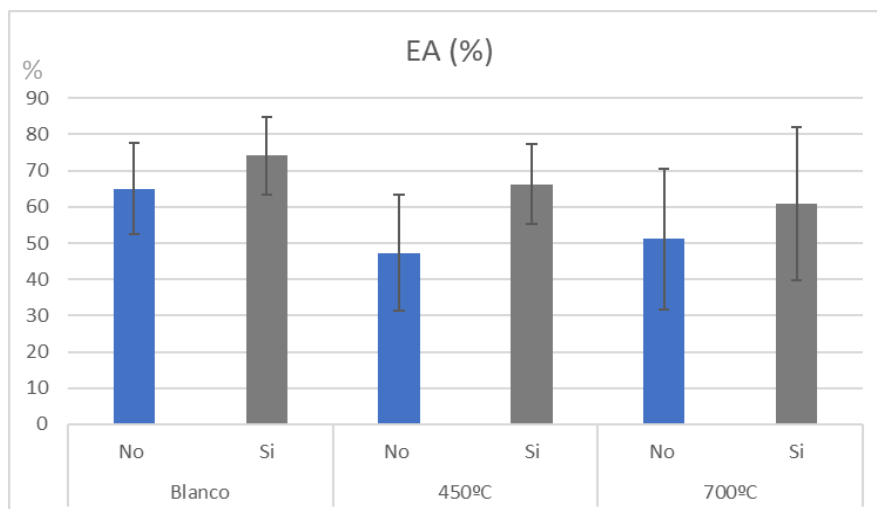


Figura 34. Gráfico de medias de la estabilidad de los agregados en función de la zona pastoreada o no pastoreada.

5. Conclusión

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio se puede concluir que las altas temperaturas características de los incendios forestales afectan negativamente a la estabilidad de los agregados del suelo. Los suelos sometidos a altas temperaturas presentan niveles de estabilidad de agregados inferiores a los suelos no sometidos a ellas, no obstante, no hay diferencia entre la estabilidad de los agregados de suelos sometidos a diferentes temperaturas de calcinación.

Por otra parte, se han podido conocer las propiedades de los suelos de las diferentes zonas estudiadas. Los suelos mayoritariamente son básicos, con predominancia de la textura franco arcillo-arenosa y niveles de salinidad muy variados. Destacan los valores de materia orgánica, que a excepción de una de las muestras de la Sierra Perenchiza que presenta valores normales, el resto presentan valores muy altos.

Asimismo, se han relacionado varias propiedades fisicoquímicas con la estabilidad de los agregados, obteniendo relaciones significativas positivas con la cantidad de materia orgánica y negativas con los carbonatos y el pH. Estas relaciones se han dado en los siguientes casos:

-Estabilidad de los agregados en condiciones naturales con el porcentaje de materia orgánica en Sagunto.

-Estabilidad de los agregados a 450°C con: porcentaje de carbonatos, pH en Serra y materia orgánica en Guadalaviar.

-Estabilidad de los agregados a 700°C con: porcentaje de carbonatos, pH, porcentaje de carbonatos en Serra y pH en Serra.

También se han relacionado los diferentes factores ambientales con la estabilidad de los agregados obteniendo diferencias significativas entre la estabilidad de agregados en función de la localización, los materiales geológicos y el tipo de vegetación. Además, también hay diferencias significativas entre la estabilidad de los agregados de los suelos con superficie quemada a diferentes temperaturas de calcinación. Según el factor ambiental, las diferencias se han presentado en los siguientes casos:

-Localización: La estabilidad de los agregados en condiciones naturales de Denia y Alberique presenta diferencias significativas con Guadalaviar y Gilet, siendo en Denia y Alberique superior. A 450°C la estabilidad de los agregados en Denia es significativamente superior a la de Alberique y Guadalaviar.

-Vegetación: La estabilidad de los agregados en condiciones naturales es significativamente superior en las parcelas de cultivo abandonado con vegetación herbácea respecto a la correspondiente a pino albar, enebros y sabinas, y las antiguas zonas agrícolas de mandarinos. A 450°C la estabilidad de los agregados de las parcelas de cultivo abandonado con vegetación herbácea es significativamente superior al resto.

-Material geológico: En condiciones naturales la estabilidad de los agregados es significativamente inferior en los mantos aluviales encostrados respecto al resto de materiales. A 450°C la estabilidad de los agregados es significativamente inferior en las areniscas respecto al resto de materiales, y a 700°C las areniscas presentan valores significativamente inferiores respecto a la caliza.

-Superficie quemada: La estabilidad de los agregados en condiciones normales de los suelos con superficie quemada es significativamente superior a la estabilidad de los agregados con superficie quemada sometidos a 450°C.

Por último, no se han obtenido diferencias significativas entre la estabilidad de los agregados en función del tipo de superficie, quemada o no quemada, ni del tipo de zona, pastoreada o no pastoreada.

6. Bibliografía

AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA, 2017. *El efecto Foehn en España*. Disponible en: <https://aemetblog.es/2017/08/02/el-efecto-foehn-en-la-peninsula-iberica/>. (Consulta: junio 2022).

ALARCÓN, A. L., 2016. *Recuperación de suelos fatigados en agricultura intensiva*. Infoagro. Méjico.

ARCENEGUI, V., 2011. *El fuego sobre el suelo. Los cambios en la superficie tras un incendio*. Universidad de Valencia. Valencia.

ARCENEGUI, V. et al., 2008. *Immediate Effects of Wildfires on Water Repellency and Aggregate Stability in Mediterranean Calcareous Soils*. *Catena*, 74: 219-226.

ARIANOTSOU, M.; BEARD, J. S.; FERRÉS, L.; FOLCH, R.; TRABAUD, L. V., 1993. *La vida a les formacions escleròfil·les. Mediterrànies*. Ed. MAB, UNESCO. Barcelona.

ASHES TO LIFE, 2019. *El suelo: el gran perjudicado tras los incendios*. Disponible en: <https://www.ashestolife.es/el-suelo-el-gran-perjudicado-tras-los-incendios/>. (Consulta: junio 2022).

CAON, L.; VALLEJO, V. R.; RITSEMA, C. J.; GEISSEN, V., 2014. *Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems*. *Earth-Science Reviews*, 139, 47-58.

CERDÀ, A.; BODI, M. B.; LASANTA, T.; MATAIX-SOLERA, J.; DOERR, S. H., 2009. *Infiltración, estabilidad de agregados y erosión de suelos afectados por incendios forestales. Una visión a escala de pedón*. Investigación de grupo SEDER. Valencia.

DEL CAMPO, A. D., 2021. *Ecología del fuego*. Departamento de Ingeniería Hidráulica y del Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.

DILMAR, J., 2016. *Las arcillas del suelo*. Fertilab. Barcelona.

DISCOVERY, 2018. *El "Efecto Foehn"*. Disponible en: <http://www.discovery-8.com/el-efecto-fohen/#:~:text=El%20llamado%20Efecto%20Fohen%20es,de%20un%20oc%C3%A9ano%20a%20elevarse>. (Consulta: julio 2022).

GARZÓN, J. I., 2018. *Comportamiento del fuego*. Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/13031731/>. (Consulta: junio 2022).

GIOVANINI, G.; LUCSHESI, S., 1983. *Effect of fire on hydrophobic and cementing substances of soil aggregates*. *Soil Science*. 136: 231-236.

GISBERT, J. M.; IBÁÑEZ, S., 2010. *Génesis de suelos*. Ed. Universitat Politècnica de València. Valencia.

MATAIX-SOLERA, J.; CERDÀ, A.; ARCENEGUI, V.; JORDÁN, A.; ZAVALA, L. M., 2011. *Fire effects on soil aggregation: a review*. *Earth-Science Reviews*, 109, 44-60.

MATAIX-SOLERA, J.; DOERR, S. H., 2004. *Hydrophobicity and Aggregate Stability in Calcareous Topsoils from Fire-affected Pine Forest in Southeastern Spain*. *Geoderma*, 118: 77-88.

PORTA, J.; LÓPEZ, M.; ROQUERO, C., 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ed. Mundi-Prensa.

PYNE, S. J.; ANDREWS, D.L.; RICHARD, P. L., 1996. *Introduction to Wildland Fire*. John Wiley and Sons Inc. Nueva York. 269 pp.

SAÑA, J., MORÉ, J. E.; COHÍ, A., 1996. *La gestión de la fertilidad de los suelos*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 277 pp.

SORIANO, A., 2017. *Carbonatos*. Departamento de Producción Vegetal. Universidad Politécnica de Valencia.

TORRENT, J., 1998. *Evaluación de suelos en regiones mediterráneas: Importancia de las propiedades mineralógicas*. Ponencia presentada en el curso superior de Evaluación y Conservación de Suelos. Centro de Investigación y Desarrollo Agrario. Junta de Andalucía. Granada.

UNIVERSIDAD DE GRANADA, 2022. *Procedimientos de Mineralización-Calcinación*. Disponible en:

<http://www.ugr.es/~fgil/proyecto/calcinacion/fundamento.html#:~:text=Usualmente%2C%20para%20la%20destrucci%C3%B3n%20completa,de%20450%20a%20500%20%C2%BA>.

(Consulta: agosto 2022).

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA, 2022. *Carbonatos*. Disponible en: <https://www.uma.es/laboratorio-de-geomorfologia-y-suelos/info/125990/carbonatos/>.

(Consulta: agosto 2022).

USDA, 1999. *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051284.pdf. (Consulta: junio 2022).

YANEZ, J., 1989. *Análisis de suelos y su interpretación*. *Horticultura*, 49, 75-89.

6.2. Bibliografía complementaria

ACOSTA, C., 2008. *El suelo agrícola, un ser vivo*. Disponible en: <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-79266/EI%20suelo%20vivo.pdf>. (Consulta: mayo 2022).

RONDÓN, H. A., 2011. *Evaluación del comportamiento de arcillas sometidas a diferentes tiempos de exposición a altas temperaturas*. *EIA*, 16: 175-187.