



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO **FORESTAL** ESPAÑOL

9CFE-1400

Organiza





VARIABLES METEOROLÓGICAS QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE CASTAÑA: MODELO DE PRODUCCIÓN Y PREDICCIÓN DE PRODUCTIVIDAD

RUBIO GUTIÉRREZ, ROBERTO (1), GALLEGO GARCÍA, R. (1) y ARIAS LÓPEZ, DARIO. (1)

(1) Área de Recursos Naturales y Biodiversidad. Fundación Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León. Parque Científico de León. Avda. Real 1, 24006, León.

Resumen

La castaña es un producto forestal no maderero que genera una fuente significativa de rentas en el medio rural forestal de las áreas donde es característica, y un claro ejemplo de la multifuncionalidad de los sistemas forestales.

Sin embargo, la producción de castaña está supeditada a diferentes parámetros y variables que impiden optimizar recursos de gestión, planificar su recogida y proporcionar a las empresas comercializadoras información que contribuya a garantizar el suministro estable de producto fresco a los mercados e industria de transformación durante el otoño.

Este trabajo realiza un análisis de las variables y parámetros meteorológicos con el objetivo de identificar aquellos que mejor explican la productividad de castaña. Finalmente, se realizó una regresión múltiple para crear un modelo matemático que relacione estas variables con la productividad y permita predicciones futuras de producción de cosecha, facilitando en la medida de lo posible la toma de decisiones en determinados aspectos de la gestión de los sotos de castaño para maximizar la producción y calidad de la castaña.

Palabras clave

Castaña, modelo, producto forestal no maderero

1. Introducción

El castaño europeo (*Castanea sativa* Mill.) destaca como una de las especies más relevantes en la comarca del Bierzo, no solo por su presencia en las masas forestales de la comarca, sino también debido a su importancia económica, ecológica y cultural.

A lo largo de la historia, su fruto, la castaña, ha sido de vital importancia por ser un recurso alimentario de primer orden en la sociedad rural y una fuente importante de ingresos por la venta de fruto, mientras que su madera ha desempeñado un papel clave en la construcción y la artesanía, sin olvidar el calor de la leña o la ingente producción de hongos. En la actualidad, el cultivo del castaño enfrenta desafíos como el cambio climático y las amenazas fitosanitarias, pero también ofrece grandes oportunidades para impulsar la sostenibilidad económica en las áreas rurales forestales, no solo del Bierzo, sino también de aquellas áreas donde el castaño es característico.

- Biología, ecología y fenología del castaño

El castaño europeo es un árbol de gran porte, alcanzando hasta 35-40 metros de



altura, si bien la altura en los ejemplares para producción de fruto raramente supera los 15-20 m. Cuando el objeto productivo es la producción de fruto alcanzan diámetros que pueden llegar a superar los 15 m de perímetro como es el caso del castaño de Villar de Acero (El Bierzo) “El Campano”. Pertenece a la familia de las fagáceas, presentando hojas alternas, simples, de un verde intenso y un fruto que se desarrolla envuelto en un erizo cubierto de espinas. Este árbol se adapta a diversas condiciones climáticas, pero tiene preferencia por suelos silíceos y climas con precipitaciones anuales superiores a 600 mm., temperaturas anuales medias entre 9 y 13 °C, siendo 27 °C la temperatura máxima media (Heiniger y Conedera, 1992; Gomes-Laranjo et al., 2008). Según Dinis et al. (2011), las regiones de castaños deben tener entre 1900 y 2200 grados-día (°D) entre mayo y octubre (Cesaraccio et al., 2001; Dinis et al., 2011). La actividad fotosintética máxima ocurre entre los 24 y 28 °C en árboles adultos, pero disminuye por termo inhibición cuando la temperatura del aire supera los 32 °C, algo frecuente en verano (Gomes-Laranjo et al., 2006, 2008).

Además, es sensible a condiciones extremas, como heladas tardías o periodos de sequía prolongada, que pueden afectar la calidad y cantidad de la cosecha. Fernández-López et al. (2005) estudiaron la diferenciación geográfica en los rasgos adaptativos de las poblaciones silvestres de castaños en España utilizando datos climáticos (por ejemplo, variación de la temperatura, precipitación/déficit hídrico en verano y la temperatura del mes más cálido) e incorporando variables meteorológicas como heladas durante la brotación, temperatura media del mes más cálido, precipitación estival y sequías.

El rango altitudinal es variable, siendo desde el nivel del mar hasta los 1.000m en las áreas del norte y noroeste peninsular y hasta los 1500 m aproximadamente en el sur peninsular.

Respecto a la fenología en la comarca del Bierzo, la brotación se produce desde principios de abril según si el castaño es bravo o injerto y de las condiciones climáticas del principio de la primavera, seguida del periodo de floración, que abarca de junio a principios del mes de julio. La etapa final, correspondiente al desarrollo del fruto, transcurre entre agosto y octubre, coincidiendo este último con el principio de la caída de las castañas para los cultivares tradicionales que puede alargarse hasta los primeros días del mes de noviembre. Cultivares híbridos recientemente introducidos adelantan la disponibilidad del fruto al mes de septiembre.

- Distribución y producción de la castaña

El castaño se distribuye ampliamente en España, adaptándose a diversas condiciones climáticas y ocupando más de 275.000 hectáreas. Aunque Asturias lidera en superficie con 120.943 ha (IFN3), su principal objetivo productivo allí es la producción de madera. En contraste, la producción de castaña se concentra en Galicia, Castilla y León, Andalucía y Extremadura. Regiones como Navarra, Cantabria y Euskadi están redescubriendo su potencial productivo, impulsadas por iniciativas para recuperar el cultivo de fruto, afectado históricamente por las enfermedades que relegaron a la especie a casi la desaparición.

Con el objetivo productivo de castaña, a nivel global, España, con una producción media de 40.000 Tn/anuales, se sitúa entre los principales países productores de castaña en Europa, junto a Italia, Portugal y Francia. Ya en España, Galicia destaca



como líder en producción, con más del 50% del total y Castilla y León un 25%, siendo Extremadura y Andalucía las regiones que les siguen en el ranking productivo.

El cultivo del castaño no solo contribuye a la economía local, sino que también desempeña un papel clave en la preservación del paisaje y la biodiversidad en aquellas áreas donde es característico.

En la comarca del Bierzo el castaño ocupa una superficie cercana a las 15.600 ha, considerando 13.200 ha con propósito productor de fruto, encontrándose óptimamente gestionadas para la producción de fruto únicamente 5.750 ha. y 7.450 ha se encuentran en un escenario de baja o mínima gestión. El resto de la superficie tiene por objetivo la producción de madera.

- Amenazas, riesgos y retos fitosanitarios para la producción de castaña.

Al castaño le afectan una serie de riesgos bióticos y abióticos que condicionan tanto su productividad como su pervivencia. Las principales plagas con mayor incidencia son: la avispa del castaño (*Dryocosmus kuriphilus* Yasumatsu) que condiciona la productividad de fruto en función de la sensibilidad que presenta cada cultivar a la plaga. También relacionado con la calidad y producción del fruto, los riesgos asociados a los insectos carpófagos que son causantes de la incidencia del agusanado de la castaña que evita la comercialización y posterior consumo de la castaña afectada.

En el caso de las enfermedades: el chancro (*Chryphonectria parasitica* (Murrill) Barr), la tinta del castaño (*Phytophthora cinnamomi* Rands) y la *Gnomoniopsis* o podredumbre marrón de la castaña (*Gnomoniopsis smithogilvyi* L.A.Shuttlew., E.C.Y.Liew & D.I.Guest), son las principales afecciones que pueden condicionar no solo la producción, sino también la pervivencia del castaño (chancro y tinta).

Por otro lado, entre los riesgos abióticos más relevantes encontramos los incendios forestales y las condiciones climáticas en constante evolución que limitan la presencia y productividad de la especie.

- Gestión sostenible del castaño y su cultivo.

La gestión sostenible de los castañares es esencial para garantizar su productividad y conservación a largo plazo. Esto incluye buenas prácticas en las diferentes operaciones de gestión, el control de plagas mediante métodos biológicos, y el uso de sistemas de riego eficientes que pueden minimizar en la producción la ausencia de precipitaciones en estaciones más secas. Además, en plantaciones modernas, la disponibilidad de materiales de reproducción adecuados tiene una importancia mayor en cuanto su vigor, compatibilidad patrón-injerto o adaptación a factores bióticos o abióticos.

- Impacto económico y social.

La castaña es un recurso clave para la población del medio rural, generando ingresos significativos y contribuyendo a la fijación de población en el medio rural. En España, el impacto económico del sector supera los 300 millones de euros anuales. Además, el fruto se comercializa tanto en mercados locales como internacionales, ya sea en fresco o transformado en productos de alto valor



añadido como marrón glasé, harina de castaña, purés u otros tipos de productos donde la castaña o sus derivados están presentes. La cadena de valor del sector incluye a miles de productores, comercializadores e industrias transformadoras de diverso tamaño, especialmente artesanos, que trabajan para maximizar el aprovechamiento de este recurso y crear empleo en el medio rural.

Y analizando el potencial productivo del castaño, cabe mencionar la producción cesterera en Montemayor del Río (Salamanca), el aprovechamiento de madera en Asturias o la producción de miel de castaño, premiada habitualmente por su calidad, como ejemplos de la importancia de la diversidad productiva y económica del castaño en España.

En el caso del Bierzo, son de interés principalmente, la producción de castaña, el aprovechamiento de leñas o la producción de miel.

- Cultura y tradiciones asociadas al castaño.

El castaño está profundamente arraigado en la cultura de muchas regiones de España en general y del Bierzo en particular. Tradiciones como el magosto celebran la cosecha de la castaña y refuerzan los lazos comunitarios. Estas festividades, que tienen lugar en otoño, incluyen la preparación y consumo de castañas asadas, acompañadas de música y otro tipo de actividades. Además, el castaño es considerado un árbol sagrado en algunas culturas, dejando un legado etnográfico y arquitectónico que incluye construcciones como los “Sequeiros” y “oriceiras”, utilizados para el secado y almacenamiento del fruto.

- Innovación y futuro del sector.

El futuro del castaño y su conservación depende de la capacidad del sector para adaptarse a las amenazas y las exigencias del mercado. Esta capacidad, de adaptación y resiliencia continua del sector, se viene logrando en parte gracias al impulso de los organismos de concertación sectorial como la Mesa del Castaño del Bierzo o la Red Estatal del Castaño que han promovido la colaboración interinstitucional, sectorial y del ámbito investigador en los ámbitos regionales, nacional e internacional.

La conservación del castaño y el mantenimiento de su área productiva pasan tanto por la restauración y recuperación de áreas productivas como por las nuevas plantaciones que son alternativas de futuro para el desarrollo de este hábitat productivo.

Sin embargo, la introducción de tecnología en la producción, y la gestión de base científica ofrece nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del cultivo. No se debe olvidar, mejorar la eficiencia en las actividades u operaciones de gestión que pasan por la mecanización de algunas de ellas, como la recogida mecanizada del fruto.

Igualmente, para solucionar las principales afecciones de origen biótico, el uso de la biotecnología parece tener un papel fundamental, en la identificación y aplicación segura de soluciones basadas en la naturaleza para minimizar su impacto, así como la selección de materiales de reproducción que maximicen la producción a la par que se adaptan en un contexto de cambio constante.

Asimismo, la apuesta por la calidad, la diversificación de productos y la promoción



de la castaña en mercados internacionales son fundamentales para consolidar su posición como un recurso estratégico.

Sin embargo, para la aplicación de nuevos desarrollos tecnológicos y su adaptación a la castañicultura es necesario conocer algunas variables que contribuyan a predecir y maximizar la producción de castaña como propósito productivo.

2. Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo identificar las variables climáticas y parámetros, que condicionan la producción de castaña en la comarca del Bierzo, En este sentido, los dos objetivos específicos del estudio son: (i) identificar las variables y parámetros climáticos que condicionan la producción de castaña; y (ii) desarrollar modelos de predicción de la productividad de castañas basados en variables meteorológicas.

3. Metodología

- Área de estudio y datos.

Este trabajo utiliza datos de producción de castañas, datos climatológicos históricos y de afección de avispa en 15 localizaciones de la comarca de El Bierzo en el periodo 2010-2022, incluyendo:

1. Valores anuales de observaciones y registros de producción de castañas proporcionados por castañicultores y agrupaciones de productores.
2. Valores diarios de variables meteorológicas para cada localización:
 - precipitation_sum mm Suma de la precipitación diaria (incluyendo lluvia, chubascos y nieve)
 - temperatura_2m_max °C Temperatura máxima y mínima diaria del aire a 2 metros sobre el suelo
 - temperatura_2m_min °C Temperatura máxima y mínima diaria del aire a 2 metros sobre el suelo
 - temperatura_media °C Temperatura media diaria
 - et0_fao_evapotranspiración mm Suma diaria de ET_0 Evapotranspiración de referencia de un campo de césped bien regado. Basada en las ecuaciones de Penman-Monteith de FAO-56.

En El Bierzo, el castaño se encuentra distribuido por toda la comarca, excluyendo el área de el Bierzo central de la presencia de masas naturales y sotos de castaño continuos, salvo ejemplares diseminados o pequeñas plantaciones, siendo su presencia inferior a un 2% de la superficie total de estos municipios.

Según la clasificación climática de Köppen-Geiger, la comarca de El Bierzo, en el noroeste de León, se caracteriza por un clima mediterráneo de veranos suaves, identificado como Csb. Este tipo de clima se define por tener una temperatura media en el mes más cálido inferior o cercana a los 22 °C, con más de cuatro meses al año superando los 10 °C. Además, presenta una estación seca en verano.

No obstante, el clima en El Bierzo varía según la altitud y la orientación del terreno, generando diversos microclimas. En las zonas montañosas, las precipitaciones pueden superar los 900 mm anuales, alcanzando hasta el doble en



el Valle de Ancares, con temperaturas medias anuales que no superan los 10 °C. En contraste, la depresión central de la comarca experimenta un clima más cálido y continentalizado.

Las áreas y superficies concretas del área de estudio se obtuvieron del inventario de castaño realizado por Cesefor y Agresta S. Coop. en el marco del proyecto Grupo Operativo Prominifun, que actualizó la superficie de castaño en la comarca del Bierzo utilizando imágenes multiespectrales para discernir la superficie de castaño del resto sistemas forestales, y datos del último vuelo LIDAR disponible para ajustar el estado de la gestión y el objetivo productivo del mismo.

Para el presente trabajo, se seleccionaron aquellas teselas en las que se disponían observaciones de producción de castaña, conservando los ID de cada una de ellas como referencia.

Además, en cuanto a los datos meteorológicos y ante la inexistencia de estudios previos sobre la dependencia del clima de la castaña en la comarca del Bierzo, se han tomado como referencia los datos proporcionados por la plataforma Open Data meteo.

La API de datos meteorológicos históricos se basa en conjuntos de datos de reanálisis y utiliza una combinación de observaciones de estaciones meteorológicas, aeronaves, boyas, radares y satélites para crear un registro completo de las condiciones meteorológicas históricas. Estos conjuntos de datos pueden completar los vacíos mediante el uso de modelos matemáticos para estimar los valores de varias variables meteorológicas. Como resultado, los conjuntos de datos de reanálisis proporcionan información meteorológica histórica detallada para lugares que pueden no haber tenido estaciones meteorológicas cercanas, como áreas rurales o el océano abierto.

Los modelos para datos meteorológicos históricos utilizan una resolución espacial de 9 km para resolver detalles finos cerca de costas o terrenos montañosos complejos. En general, una resolución espacial más alta significa que los datos son más detallados y representan las condiciones meteorológicas con mayor precisión a escalas más pequeñas, por lo que se puede adaptar a la distribución de las teselas con las observaciones de producción del proyecto.

El conjunto de datos IFS del ECMWF ha sido elaborado meticulosamente por Open-Meteo mediante simulaciones realizadas a las 0z y a las 12z, empleando la versión más actualizada de IFS. Este conjunto de datos ofrece la máxima resolución y precisión a la hora de representar las condiciones meteorológicas históricas y ha proporcionado datos históricos diarios corregidos para las características meteorológicas locales de cada tesela.

De acuerdo a referencias de trabajos previos existentes sobre la influencia meteorológica en la producción de castaña (Bounous, 2002a; Fernández-López et al., 2005; Wilczynski y Podlaski, 2007; Gomes-Laranjo et al., 2006, 2008), se han calculado un conjunto de variables meteorológicas (por ejemplo, máximas, mínimas y medias de temperatura, precipitación y evapotranspiración para grupos específicos de meses) y parámetros meteorológicos, como el número mensual de días con temperatura máxima, mínima y media por encima/por debajo/entre umbrales definidos (por ejemplo, número de días con temperatura mínima del aire por debajo de 10 °C en enero, $Nd(tmin10_mesn)$ ($tmin10_mes1 < 10$ °C), número de días en agosto con temperatura máxima del aire por encima de 28 °C, $Nd(tmax28_mes8)$ ($tmax28_mes8 > 28$ °C) o el número de días con temperatura



máxima entre 24 °C y 28 °C en junio, $Nd(t_{max24_28_mes6})$ ($24\text{ °C} < t_{max24_28_mes6} < 32\text{ °C}$). Los números posteriores a mes representan el mes en que se obtuvieron los datos utilizados para calcular la variable.

- Método

Después de un análisis preliminar de calidad y exploratorio de los datos brutos de acuerdo al modelo establecido según Pereira et al. (2011) se utilizaron las variables y parámetros meteorológicos con potencial para influir en la productividad de la castaña en la comarca del Bierzo. Se siguió el resultado del análisis de composición realizado en el trabajo anteriormente citado para la selección de variables y parámetros climáticos.

Durante el análisis preliminar se agruparon los datos de las observaciones anuales de productividad en cada tesela y se realizó una base de datos única relacionada con los datos meteorológicos para cada una de estas áreas.

Para determinar la magnitud y dirección de la relación entre la producción/productividad de la castaña y los factores meteorológicos, se calculó el coeficiente de correlación de Spearman. Este coeficiente no paramétrico fue seleccionado debido a su capacidad para evaluar asociaciones entre variables ordinales o continuas sin asumir una distribución normal de los datos. Esta técnica complementaria se aplicó dentro del período de análisis.

Después de la identificación de los posibles predictores meteorológicos, para la limpieza y manipulación de los datos, se utilizó el conjunto de paquetes tidyverse (Wickham et al., 2019), específicamente dplyr para la manipulación de datos y ggplot2 para la visualización. Igualmente mediante el método IQR se eliminaron los outliers.

Un modelo de regresión lineal múltiple se ajustó utilizando la función `lm()` de la librería base de R para desarrollar un modelo de regresión lineal múltiple para simular y predecir la producción/productividad de la castaña con diferentes métodos de selección (por ejemplo, paso a paso, hacia adelante y hacia atrás). Una descripción completa de estos métodos de selección de predictores se puede encontrar en Austin y Tu (2004), Miller (1984, 2002) y Hocking (1976). Fernández-López y colaboradores (2005) establecieron un precedente al emplear un análisis de regresión lineal para examinar la relación entre el rendimiento de los castaños españoles, los datos climáticos y geográficos en un contexto similar.

Entre otras suposiciones, la regresión lineal requiere que los predictores sean linealmente independientes (colinealidad), las muestras sean representativas de la población y que los términos de error tengan media cero, varianza constante (homocedasticidad), normalidad (para fines de pruebas de hipótesis) y no estén correlacionados.

Para evaluar la multicolinealidad en el modelo, se calcularon los Factores de Inflación de la Varianza (VIF) utilizando la función `vif` del paquete `car` en R (Fox & Weisberg, 2023) que es una medida común para detectar multicolinealidad entre las variables independientes, y se eliminaron las variables VIF que presentaban alta colinealidad. Para evaluar la autocorrelación en la serie de tiempo, se utilizó la función `correlate` del paquete `corr` (Wickham, 2017) para calcular la matriz de correlación.

Para evaluar la presencia de heterocedasticidad, y determinar que los términos de error tiene varianza constante se realizó la prueba de Breusch-Pagan utilizando la



función `bptest` del paquete `lmtest` (Hothorn et al., 2022)

Se utilizaron las pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov, implementadas en el paquete `stats` de R (R Core Team, 2023), y la prueba de Lilliefors, disponible en el paquete `nortest` (Villanueva, 2021), se emplearon para probar la hipótesis nula de que los datos provienen de una población distribuida normalmente. En el contexto de series temporales, donde los datos se recolectan a intervalos regulares (por ejemplo, datos meteorológicos), es común observar autocorrelación en los residuos del modelo, debido a la dependencia entre observaciones consecutivas.

Como Lilliefors y Kolmogorov-Smirnov no proporcionaban un resultado claro se realizó un histograma y un gráfico Q-Q para visualizar los residuos con objeto de entender bien su distribución y asegurar que siguen una distribución normal.

Para evaluar la bondad del ajuste, se llevó a cabo un análisis de residuos y se calculó el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado). El R^2 ajustado mide la proporción de la variabilidad total en la productividad de la castaña que es explicada por las variables independientes incluidas en el modelo, pero penaliza la inclusión de variables que no aportan información relevante. Esta medida es especialmente útil cuando se comparan modelos con diferentes números de predictores, ya que evita el sobreajuste, es decir, la creación de modelos demasiado complejos que se ajustan muy bien a los datos de entrenamiento, pero tienen un bajo poder predictivo en nuevos datos

Además, para evaluar el ajuste del modelo, se calcularon estadísticas como el error cuadrático de la suma (SSE), el error cuadrático medio (MSE), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y el criterio de información de Mallows (C_p). El MSE, definido como el SSE dividido por los grados de libertad residuales, representa el error promedio de las predicciones. El RMSE, siendo la raíz cuadrada del MSE, proporciona una medida del error en las mismas unidades que la variable respuesta. El C_p de Mallows, por su parte, es una estimación del error cuadrático medio de predicción y se utiliza para seleccionar el modelo que ofrece el mejor equilibrio entre ajuste y complejidad.

Con objeto de mejorar el modelo se utilizó la selección *stepwise*, que ayuda a seleccionar las variables más relevantes para un modelo predictivo, añadiendo o eliminando variables en función de su contribución al modelo, generalmente basándose en un criterio de ajuste del modelo, como el AIC (Akaike Information Criterion) o BIC (Bayesian Information Criterion). En el caso de la regresión, este enfoque puede mejorar la precisión del modelo al evitar sobreajuste o incluir variables irrelevantes. En R, se puede realizar la selección *stepwise* utilizando la función básica `step` que ajusta un modelo de forma secuencial, probando diferentes combinaciones de predictores y eligiendo el modelo con el mejor valor de AIC o BIC. Una vez realizado el ajuste, el modelo se sometió a un nuevo análisis de Factores de Inflación de la Varianza (VIF) y colinealidad, eliminando las variables con alta colinealidad y desarrollando un nuevo modelo ajustado (Ms/Col).

Para la definición del modelo predictivo basado en una fórmula que incluye variables climáticas seleccionadas como predictores de la productividad de castaña (`kg_ud`) se realizó un ajuste de los datos de entrenamiento mediante la función `lm()` en R, realizando un resumen estadístico del modelo, destacando las variables más significativas, los coeficientes de regresión y métricas como el coeficiente de determinación ajustado (R^2). Además, el modelo predictivo fue evaluado para la generación de predicciones, las cuales fueron calculadas para el



conjunto de prueba utilizando la función predict(). Se calcularon las métricas de desempeño ((MSE, RMSE y R2). Finalmente, se realizaron gráficos comparativos para evaluar visualmente la relación entre los valores reales y las predicciones y un gráfico de dispersión con la línea de referencia ($y=x$) permitió identificar áreas donde el modelo subestima o sobreestima los valores reales.

4. Resultados

La distribución geográfica del cultivo del castaño está estrechamente ligada a las condiciones edafoclimáticas. En el Bierzo, esta especie se extiende a lo largo de un amplio rango altitudinal, desde los 380 m en Puente Domingo Flórez hasta los 1000 m en zonas como el Alto Sil, Ancares y Bierzo Oeste. Si bien su distribución es amplia, la mayor producción se concentra en altitudes superiores a los 500 m, donde las condiciones ambientales parecen ser óptimas para su desarrollo. Este patrón se replica en otras regiones de la Península Ibérica con características biogeográficas similares, como las regiones eurosiberiana y mediterránea, donde el cultivo del castaño se extiende desde el noroeste peninsular hasta el sur, ocupando zonas montañosas y valles con condiciones climáticas y edáficas favorables.

La ausencia de series estadísticas de producción homogéneas y fiables dificulta la comparación temporal de los rendimientos. Por esta razón, en este trabajo se ha optado por utilizar el indicador de productividad en lugar del de producción total, con el fin de minimizar el sesgo introducido por las fluctuaciones en la superficie con este propósito productivo o la inconsistencia de los datos de producción.

La tendencia decreciente observada en las series temporales de productividad del castaño puede atribuirse a una combinación de factores bióticos y abióticos que han fluctuado a lo largo del tiempo. Entre los factores bióticos destacan la incidencia de plagas y enfermedades, como la tinta, el chancro y la avispa del castaño que han afectado significativamente a la conservación, pervivencia y vigor del hábitat productor (Portela et al., 1999; Gentile et al., 2009; Ghezi et al., 2010) y la *Gnomoniopsis smithogilvyi* a la calidad del fruto. Adicionalmente, prácticas de gestión inadecuadas, como el uso inadecuado de productos fitosanitarios o la falta de operaciones de gestión adecuada, han contribuido a exacerbar estos problemas. Por otro lado, factores abióticos como los incendios forestales, la variabilidad climática, especialmente eventos extremos como sequías o heladas tardías, pueden haber influido en la productividad de los castaños.

Siguiendo la propuesta de Pereira et al. (2011), se ha asumido que, al eliminar las tendencias a largo plazo asociadas a estos factores, la variabilidad residual en la productividad puede atribuirse principalmente a la variabilidad climática interanual. Esta hipótesis se basa en el supuesto de que los cambios climáticos a corto plazo tienen un impacto más directo y rápido en la producción de castaña que los cambios a largo plazo en las propiedades del suelo o resto de organismos presentes con capacidad de alterar el objetivo productivo del castaño. Un enfoque similar ha sido utilizado en estudios dendrocronológicos para corregir las tendencias de crecimiento relacionadas con la edad de los árboles (Wilczynski y Podlaski, 2007).

Las series temporales de productividad obtenidas (Fig. 1) presentan valores atípicos en los años 2017 y 2022. En el año de 2017 por dos razones principales: condiciones climáticas desfavorables (heladas y sequía) e incidencia elevada de

insectos carpófagos en el fruto. De hecho, la madrugada del 27 de abril, las temperaturas descendieron hasta los $-4,3^{\circ}\text{C}$ durante casi ocho horas, causando daños considerables en los cultivos de la región. En este año, la temperatura media del aire fue 1°C por debajo del promedio y la precipitación un 20% inferior a la serie histórica. En el caso de 2022, además de condiciones climáticas desfavorables, sequía y precipitaciones anuales inferiores a la media (-27%), acentuó la tendencia negativa de producción por la incidencia de la avispa del castaño.



Figura 1: Serie de productividad de castaña.

1. Características y predictores meteorológicos potenciales en la productividad para fruto del castaño

Debido al origen de los datos disponibles, observaciones de producción anual en kg/año para un determinado n° de castaños (ud), la productividad (kg/ud/año) se define como la relación entre la producción anual de castañas y el n° de castaños correspondiente en cada tesela identificada para las observaciones de cada año del periodo .

La serie temporal de productividad (2011-2022) presenta una tendencia negativa lineal de $-5.31e-01$ kg/ud/año. En este mismo orden de cosas, se espera que la variabilidad de la serie temporal desestacionalizada se deba únicamente a factores que presentan variabilidad constante durante el período de estudio como variables/parámetros meteorológicos. No obstante, y aunque se decidió utilizar la productividad de castañas desestacionalizada, la línea de tendencia de los resultados aplicados con la Productividad de castaña Corregida (PCC) y la productividad de castaña era la misma, por lo que se decidió mantener la serie temporal original sin corrección (Fig. 1).

De acuerdo con trabajos previos de análisis compuestos, se obtuvieron parámetros y variables de los datos meteorológicos de la serie temporal para cada mes, como Temperatura Máxima, Temperatura media, Temperatura mínima, Precipitación mensual, Precipitación anual, Evapotranspiración mensual, Número de días que $T_{\text{max}} < 28^{\circ}\text{C}$, $24^{\circ}\text{C} < T_{\text{max}} < 28^{\circ}\text{C}$. Además, se desagregaron datos quincenales mensuales para la precipitación.

Los resultados utilizando la correlación de Spearman para analizar la relación entre factores climáticos y la producción anual de castañas (kg/ud) identificaron las variables climáticas más influyentes, tanto positivas como negativas, en la productividad. Además, se discuten las variables menos significativas para proporcionar una visión integral de las dinámicas climáticas.

Se analizaron múltiples variables climáticas relacionadas con la producción de castañas, identificando las 10 variables con mayor correlación positiva y negativa (Tabla 1). Entre las variables positivas, destacan aquellas asociadas a la precipitación mensual y estacional, mientras que las variables negativas se relacionan principalmente con la evapotranspiración y las temperaturas extremas.

Las correlaciones más altas se encontraron en variables como la precipitación acumulada del primer trimestre del año (prq1_m3, $r = 0.3475$) y la precipitación total de enero (pr_mes1, $r = 0.3393$), lo que sugiere que mayores niveles de precipitación benefician la producción de castañas. En contraste, la evapotranspiración mensual de enero (eto_mensual_mes1, $r = -0.3740$) y la temperatura máxima de mayo (tmax24_28_mes5, $r = -0.3498$) presentaron una relación negativa significativa con la producción, indicando que las condiciones de alta temperatura y pérdida de agua afectan negativamente la productividad.

Por otro lado, variables como las temperaturas máximas del mes de diciembre (tasmax_mes12) ($r = 0.0326$) y la precipitación de la 2ª quincena del mes de noviembre (prq2_m11) ($r = -0.0059$) mostraron una correlación mínima, lo que sugiere una baja relevancia en la predicción de la producción. Estas observaciones resaltan la necesidad de centrarse en variables climáticas críticas y evitar el sobreajuste del modelo con parámetros de baja influencia.

Categoría	Variable	Correlación
Mayor correlación positiva	prq1_m3	0.3475
	pr_mes1	0.3393
	prq1_m11	0.3255
	prq1_m4	0.2932
	prq1_m10	0.2888
	pr_mes3	0.2785
	pran	0.2713
	tmin10_mes5	0.2559
	prq2_m1	0.2359
	prq1_m1	0.2355
Mayor correlación negativa	eto_mensual_mes1	-0.3740
	tmax24_28_mes5	-0.3498
	tas_mes5	-0.3121
	prq2_m12	-0.3078
	tasmax_mes5	-0.3061

tas_mes3	-0.2940
pr_mes12	-0.2923
prq1_m12	-0.2919
eto_mensual_mes2	-0.2782
tasmin_mes3	-0.2718

Tabla 1. Variables más significativas en la correlación de Spearman

Los resultados sugieren que la producción de castañas está fuertemente influenciada por la precipitación y las temperaturas extremas. Las estrategias de manejo deben priorizar la mitigación de las condiciones adversas de alta evapotranspiración y temperaturas máximas, así como optimizar el uso del agua disponible para mejorar la productividad.

Las variables menos significativas como temperaturas máximas del mes de diciembre (tasmax_mes12) y la precipitación de la 2ª quincena del mes de noviembre (prq2_m11) demuestran que no todas las variables climáticas impactan significativamente la producción, e incluso que el mismo tipo de variable/parámetro, por ejemplo, la precipitación o temperaturas de ciertos meses, podrían presentar un coeficiente de correlación positivo para un período del año y un coeficiente de correlación negativo para otro, reflejando el papel de la precipitación o la temperatura en los diferentes momentos del ciclo vegetativo. El resultado de la correlación subraya la importancia de un enfoque selectivo en la modelización.

2. Modelos de simulación y predicción de la productividad de las castañas

El análisis de regresión múltiple, ajustado mediante un enfoque y ajuste stepwise, permitió identificar los factores climáticos más relevantes para explicar la productividad de castañas (kg/ud). El modelo incluye 46 variables independientes y presenta un ajuste adecuado, con un R^2 de 0.7589 y un R^2 ajustado de 0.5883, indicando que el modelo explica el 75.89% de la variabilidad observada, mientras que el R^2 ajustado corrige este valor considerando el número de predictores en el modelo. El modelo es globalmente significativo ($F = 4.449$, $p < 0.001$).

$$\begin{aligned} \text{Productividad(kg/ud)} = & -156.10386 + (-24.51784 * \text{tas_mes11}) + (-21.74047 * \\ & \text{tasmin_mes1}) + (-8.62163 * \text{tasmin_mes3}) + (32.02703 * \text{tasmin_mes9}) + (-16.36686 * \\ & \text{tasmin_mes10}) + (28.02929 * \text{tasmin_mes11}) + (20.49433 * \text{tasmax_mes1}) + \\ & (22.02917 * \text{tasmax_mes6}) + (-0.99296 * \text{pr_mes3}) + (-1.01754 * \text{pr_mes4}) + (-0.89049 \\ & * \text{pr_mes5}) + (-0.97233 * \text{pr_mes6}) + (-6.60840 * \text{pr_mes7}) + (-0.93591 * \text{pr_mes8}) + \\ & (-0.49876 * \text{pr_mes11}) + (-0.26501 * \text{pr_mes12}) + (0.27575 * \text{pran}) + (-2.41138 * \\ & \text{eto_mensual_mes3}) + (-3.46352 * \text{eto_mensual_mes6}) + (1.10045 * \\ & \text{eto_mensual_mes7}) + (-1.18273 * \text{eto_mensual_mes8}) + (-2.46615 * \\ & \text{eto_mensual_mes9}) + (3.95010 * \text{eto_mensual_mes10}) + (-7.95492 * \\ & \text{eto_mensual_mes11}) + (4.47644 * \text{eto_mensual_mes12}) + (-0.32216 * \text{prq1_m1}) + \\ & (1.04551 * \text{prq1_m4}) + (0.39124 * \text{prq1_m6}) + (6.06942 * \text{prq1_m7}) + (4.45563 * \\ & \text{prq1_m8}) + (0.79459 * \text{prq1_m9}) + (-0.33438 * \text{prq1_m10}) + (0.47282 * \text{prq1_m12}) \\ & + (-1.00734 * \text{prq2_m2}) + (0.89792 * \text{prq2_m3}) + (-1.36484 * \text{tmin10_mes5}) + (2.50971 \end{aligned}$$



* tmin10_mes8) + (1.87335 * tmin10_mes10) + (3.27986 * tmin10_mes11) + (4.43228 * tmin10_mes12) + (1.78236 * tmax28_mes6) + (-4.85849 * tmax28_mes8) + (0.80739 * tmax24_28_mes7) + (-1.50344 * tmax24_28_mes8) + (1.66335 * tmax24_28_mes9) + (-2.24986 * tmax24_28_mes5)

Como resultado del modelo podemos considerar que:

1. Variables más significativas:
2. Temperaturas :
 - a. Temperaturas mínimas:
 - b. tasmin_mes9 (Coef = 32.03, p < 0.001): La temperatura mínima en septiembre tiene una fuerte relación positiva con la producción.
 - c. tasmin_mes11 (Coef = 28.03, p < 0.01): Un aumento en la temperatura mínima en noviembre también incrementa la producción.
 - d. Temperaturas máximas:
 - e. tasmax_mes6 (Coef = 22.03, p < 0.001): Las temperaturas máximas en junio tienen un impacto positivo significativo.
3. Precipitación:
 - a. pr_mes7 (Coef = -6.61, p < 0.001): La precipitación en julio tiene un impacto negativo significativo.
 - b. pr_mes3 y pr_mes6 (Coef = -0.99, -0.97, p < 0.001): Las precipitaciones de marzo y junio están negativamente asociadas con la producción.
4. Evapotranspiración:
 - a. eto_mensual_mes11 (Coef = -7.95, p < 0.01): La evapotranspiración en noviembre impacta negativamente la producción.
 - b. eto_mensual_mes10 (Coef = 3.95, p < 0.001): La evapotranspiración en octubre muestra un impacto positivo.

Impacto de la precipitación acumulada: Variables como prq1_m7 (Coef = 6.07, p < 0.001) y prq1_m8 (Coef = 4.46, p < 0.001) indican que la acumulación de precipitación en julio y agosto tiene un efecto positivo significativo.

2. Variables moderadamente significativas (p < 0.1):

Algunas variables, como prq1_m4 y tmax24_28_mes5, muestran tendencias hacia la significancia estadística, sugiriendo que podrían tener un impacto menor pero relevante en el modelo.

El modelo revela que las variables relacionadas con temperaturas extremas (mínimas y máximas) y la precipitación tienen los impactos más importantes en la producción de castañas. Por ejemplo, mientras las temperaturas mínimas en meses críticos como septiembre y noviembre promueven un mayor rendimiento, la precipitación excesiva en meses como julio y marzo reduce la producción. Esto subraya la sensibilidad del cultivo a condiciones específicas de temperatura y agua durante su ciclo de crecimiento.

En cuanto a las métricas de evaluación del modelo y bondad del ajuste, el modelo ajustado muestra un desempeño sólido, explicando aproximadamente el 75.89% de



la variabilidad en la producción de castañas ($R^2=0.7589$). A pesar de que el R^2 ajustado (0.5883) sugiere una posible redundancia en algunas variables predictoras, el modelo es globalmente significativo ($p < 0.001$) y presenta un RMSE de 6.10, reflejando un error promedio moderado en las predicciones.

El Error Estándar Residual (8.013) y la SSE (4173.36) indican que aún existe una parte de la variabilidad que no es explicada por el modelo, lo que sugiere la posibilidad de ajustar o refinar el enfoque. Sin embargo, el C_p de Mallows (55) respalda la selección del modelo, mostrando un balance adecuado entre complejidad y precisión.

El Test de Breusch-Pagan se utilizó para evaluar la homocedasticidad de los residuos del modelo ajustado. La hipótesis nula (H_0) del test es que los residuos presentan homocedasticidad, es decir, que la varianza de los errores es constante a lo largo de los valores predichos. El p-valor de 0.4733 es mayor al nivel de significancia convencional ($\alpha=0.05$), lo que indica que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, y que por lo tanto, los resultados sugieren que los residuos del modelo no presentan heterocedasticidad significativa.

Se realizaron dos pruebas de normalidad sobre los residuos del modelo de regresión (stepwise_modelvif) para evaluar si los mismos siguen una distribución normal, lo cual es un supuesto clave en los modelos de regresión lineal. Kolmogorov-Smirnov Test (Asymptotic One-Sample) proporcionó como resultado $D=0.15894$ y un p-valor = 0.006977 y Lillifors Test como resultado $D=0.09848$ y un p-valor = 0.009493. Como en ambos el p-valor es menor a 0.05 indica que hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, lo que sugiere que los residuos no siguen una distribución normal. Sin embargo, el resultado del análisis gráfico Q-Q plot (Fig. X) y del histograma (Fig. X) realizado para explorar visualmente las desviaciones de la normalidad indica una distribución bastante normal de los residuos.

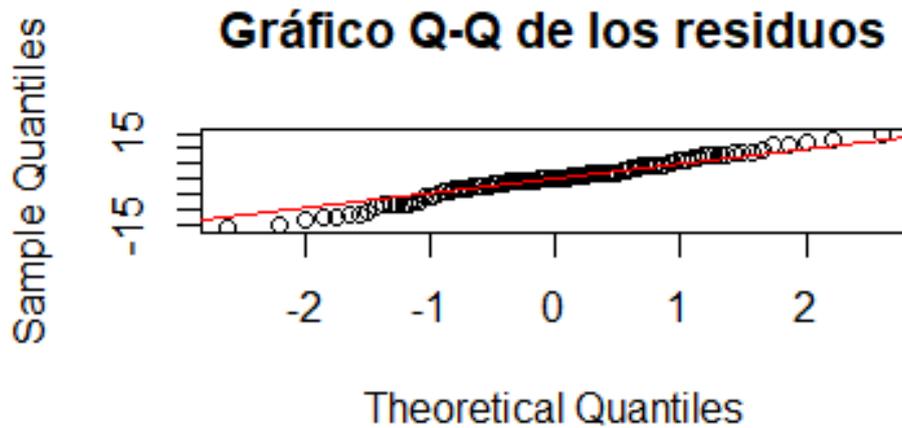


Figura: 2 Gráfico Q-Q de residuos

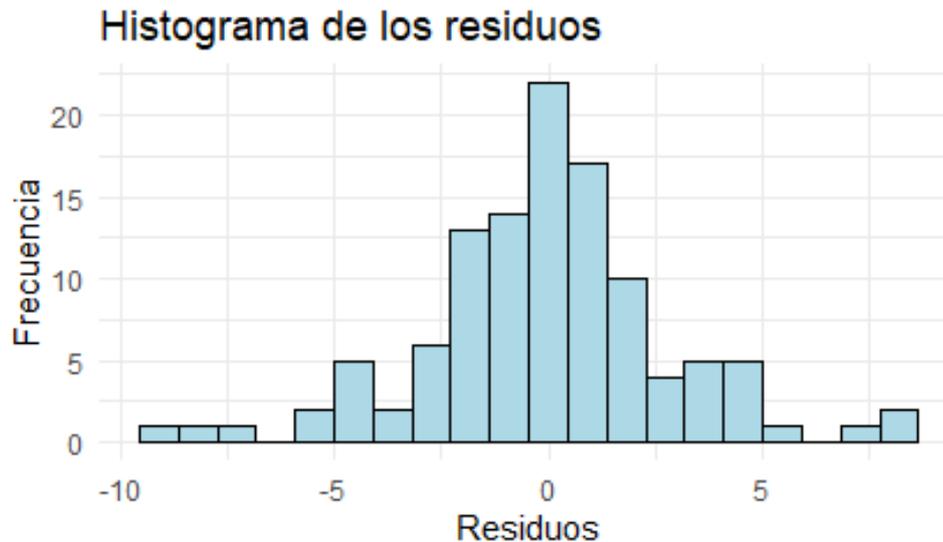


Figura: 3 Histograma de residuos.

Como resultado de un ajuste posterior para simplificar el modelo ajustado (Maj) mediante la eliminación de colinealidad y tras un nuevo proceso de selección stepwise, se dejaron 27 variables climáticas seleccionadas, mostrando que el modelo ajustado eliminando colinealidad (Ms/col) tiene un ($R^2 = 0.617$), lo que indica que el 61.7% de la variabilidad en la producción de castañas es explicada por las variables independientes incluidas en el modelo. Ambos modelos fueron comparados (Tabla 2).

Como resultado del análisis comparativo de ambos desarrollos el modelo Maj tiene un R^2 más alto (0.759) y también un R^2 ajustado mayor (0.588), lo que indica que explica mejor la variabilidad de la producción. En cuanto al error estándar residual, Maj tiene un error estándar residual más bajo (8.013), lo que sugiere que



las predicciones están más cerca de los valores reales en promedio. Respecto al número de variables, Maj incluye más variables (46 vs. 27), lo que podría introducir ruido o redundancias si no se controla adecuadamente la multicolinealidad. Esto puede ser un problema dependiendo de los objetivos del análisis y del riesgo de sobreajuste. La multicolinealidad. El modelo Ms/Col parece ser más robusto contra la multicolinealidad, ya que se seleccionaron menos variables, presumiblemente con VIF bajos. Por otro lado, Maj incluye más variables, lo que podría incrementar el riesgo de multicolinealidad. Finalmente, en ambos modelos, varias variables tienen coeficientes significativos ($p < 0.05$). Sin embargo, Maj puede estar capturando más relaciones, aunque con mayor complejidad.

Criterio	Modelo ajustado eliminando colinealidad (Ms/Col)	Modelo ajustado (Maj)
	27	46
	0.617	0.759
	0.494	0.588
	8.884	8.013
	5.012 ($p < 0.001$)	4.449 ($p < 0.001$)
	Reducida mediante selección	Potencialmente más alta
	Alta	Alta

Tabla 2: Comparación de modelos

Con el objetivo de desarrollar un modelo de productividad de castañas con capacidad de predicción, repetimos el proceso pero restringiendo los predictores de variables/parámetros meteorológicos a aquellos que utilizan información básica antes del mes de octubre, lo que significa, al menos, 15 días antes del período de recolección. El análisis de regresión, da como resultado un modelo para predecir la serie temporal de productividad de castaña desestacionalizada (Predprod) con un valor R2 de 61,9%, basado en 33 predictores de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \text{PredProductividad (kg_ud)} = & 158.2887 + (-12.0257 * \text{tasmin_mes1}) + (-3.0754 * \\
 & \text{tasmin_mes3}) + (11.1116 * \text{tasmin_mes9}) + (3.7346 * \text{tasmax_mes1}) + (9.3553 * \\
 & \text{tasmax_mes6}) + (-0.2082 * \text{pr_mes3}) + (-0.5555 * \text{pr_mes4}) + (-0.0658 * \text{pr_mes5}) + \\
 & (-0.7347 * \text{pr_mes6}) + (-2.8536 * \text{pr_mes7}) + (-0.7218 * \text{pr_mes8}) + (0.0477 * \text{pran}) + \\
 & (-0.4617 * \text{eto_mensual_mes3}) + (-2.5652 * \text{eto_mensual_mes6}) + (-0.0860 * \\
 & \text{eto_mensual_mes7}) + (-0.7669 * \text{eto_mensual_mes8}) + (0.8638 * \text{eto_mensual_mes9}) \\
 & + (0.0035 * \text{prq1_m1}) + (0.2424 * \text{prq1_m4}) + (0.2880 * \text{prq1_m6}) + (2.5527 * \\
 & \text{prq1_m7}) + (2.5248 * \text{prq1_m8}) + (0.5690 * \text{prq1_m9}) + (-0.3327 * \text{prq2_m2}) + (0.0035 \\
 & * \text{prq2_m3}) + (0.3672 * \text{tmin10_mes5}) + (0.1394 * \text{tmin10_mes8}) + (1.5575 * \\
 & \text{tmax28_mes6}) + (-1.7669 * \text{tmax28_mes8}) + (0.3242 * \text{tmax24_28_mes7}) + (-0.7042 *
 \end{aligned}$$



$$tmax24_28_mes8) + (0.2912 * tmax24_28_mes9) + (-3.1751 * tmax24_28_mes5)$$

El resultado de la evaluación del modelo de predicción proporciona un R^2 múltiple: 0.61960 explicando el 61.96% de la variabilidad en la producción de castañas que después de ajustar por el número de predictores, el modelo explica aproximadamente el 40.32% de la variabilidad, lo que sugiere que algunos predictores podrían tener contribuciones marginales. Con un error estándar residual (RSE) de 9.694, indicando que los errores promedio de las predicciones son de aproximadamente 9.69 unidades de producción. La significancia global del modelo presenta un F-Statistic: 2.863 (p-value = 0.0002239), por lo que el modelo es globalmente significativo, indicando que al menos una de las variables predictoras tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la variable dependiente. En cuanto a las variables predictoras más significativas ($p < 0.05$) encontramos:

1.
 - a. $tasmin_mes1$ ($\beta = -12.03$, $p = 0.02264$): Las temperaturas mínimas en enero tienen un impacto negativo significativo en la producción.
 - b. $tasmin_mes9$ ($\beta = 11.11$, $p = 0.02532$): Las temperaturas mínimas en septiembre están positivamente relacionadas con la producción.
 - c. pr_mes6 ($\beta = -0.73$, $p = 0.00777$): La precipitación en junio tiene un impacto negativo significativo.
 - d. pr_mes7 ($\beta = -2.85$, $p = 0.02792$): La precipitación en julio afecta negativamente la producción.
 - e. pr_mes8 ($\beta = -0.72$, $p = 0.04500$): La precipitación en agosto también tiene un efecto negativo significativo.
 - f. $prq1_m8$ ($\beta = 2.52$, $p = 0.01392$): La precipitación acumulada en agosto está positivamente relacionada con la producción.
 - g. $prq1_m9$ ($\beta = 0.57$, $p = 0.04674$): La precipitación acumulada en septiembre muestra una relación positiva.
 - h. $tmax24_28_mes5$ ($\beta = -3.18$, $p = 0.00683$): Las temperaturas máximas extremas en mayo tienen un impacto negativo significativo.
 - i. Y como variables moderadamente significativas ($p < 0.1$) tenemos:
 - j. pr_mes4 ($\beta = -0.56$, $p = 0.05678$): La precipitación en abril tiene un efecto negativo cercano a la significancia.
 - k. $eto_mensual_mes6$ ($\beta = -2.57$, $p = 0.05067$): La evapotranspiración en junio tiene un impacto negativo marginalmente significativo.
 - l. $prq1_m7$ ($\beta = 2.55$, $p = 0.05019$): La precipitación acumulada en julio tiene un efecto positivo cercano a la significancia.

La evaluación del desempeño del modelo da como resultado que el error cuadrático medio (MSE)=159.59, refleja un error promedio aceptable considerando la escala de la variable dependiente. La raíz del error cuadrático medio (RMSE) =12.63 por lo que el modelo predice la producción de castañas con una desviación promedio de 12.63 unidades respecto a los valores reales.

El gráfico (Fig. 4) muestra la relación entre los valores reales (kg/ud) y los valores predichos por el modelo. La línea roja discontinua representa la línea ideal ($y=x$), donde las predicciones coincidirían perfectamente con los valores reales. En



cuanto a distribución de los Puntos en su mayoría están alineados cerca de la línea ideal, indicando que el modelo predice razonablemente bien los valores reales en algunos rangos. Sin embargo, hay desviaciones significativas en ciertas áreas, especialmente en los valores extremos. Respecto a las subestimaciones algunos puntos se encuentran por debajo de la línea roja, lo que indica que el modelo subestima la producción real en ciertos casos. En las sobreestimaciones otros puntos están por encima de la línea, lo que refleja que el modelo sobreestima la producción en esos casos. Finalmente el análisis presenta tendencias por rangos en los que el modelo parece funcionar mejor en valores intermedios de productividad kg_ud y en los valores más bajos y más altos, se observan mayores desviaciones, lo que podría indicar que el modelo tiene dificultades para capturar correctamente los patrones extremos.

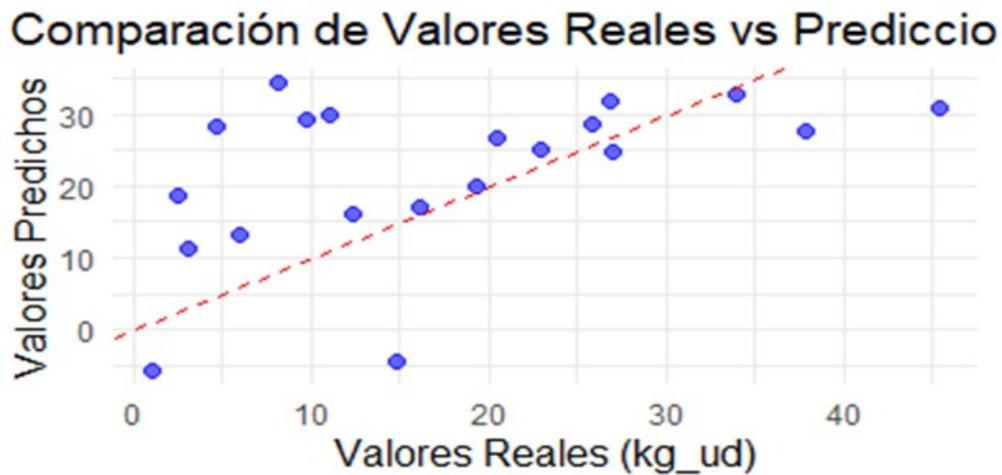


Figura. 4. Comparación de valores reales vs. predichos

5. Discusión

El análisis realizado confirma que la producción de castañas en la comarca del Bierzo está altamente influenciada por factores climáticos, en particular por la temperatura y la precipitación. Se observó que las temperaturas mínimas en meses clave, como septiembre y noviembre, tienen una relación positiva significativa con la productividad, mientras que las temperaturas extremas y la evapotranspiración en meses como junio y julio afectan negativamente el rendimiento.

Este estudio corrobora investigaciones previas que destacan la sensibilidad de la castaña a las condiciones climáticas específicas durante su ciclo fenológico. Sin embargo, los resultados también subrayan la importancia de considerar las interacciones entre variables climáticas y prácticas de gestión para mitigar los efectos adversos y maximizar la productividad.

El modelo predictivo ajustado proporciona una herramienta útil para anticipar la producción anual de castañas, facilitando la toma de decisiones en la gestión de los



sotos de castaño. No obstante, el desempeño del modelo podría mejorarse al incluir variables adicionales relacionadas con la gestión de las plagas y enfermedades u otras actividades como la aportación o no de riego, que también influyen significativamente en la producción.

A pesar de que el modelo muestra un buen ajuste general ($R^2 = 0.7589$), la presencia de desviaciones en los valores extremos resalta la necesidad de desarrollar modelos más robustos que capten mejor la variabilidad inherente en los datos de producción y productividad. Además, resulta esencial vincular los datos de productividad a las características específicas de los castaños, con el propósito de simular de manera global el comportamiento de las teselas y la superficie total de castaño. Esto permitirá considerar el impacto de los niveles de gestión y los diferentes objetivos productivos en las predicciones.

6. Conclusiones

Las principales conclusiones del trabajo son:

1. **Influencia de las variables climáticas:** La precipitación acumulada y las temperaturas extremas son los factores más determinantes en la productividad de castañas. La precipitación excesiva en meses específicos como julio afecta negativamente, mientras que la precipitación acumulada en meses clave favorece la producción.
2. **Modelos predictivos:** El modelo ajustado permite predecir la productividad de castañas con un nivel aceptable de precisión. No obstante, la complejidad del modelo y la variabilidad de los datos sugieren la necesidad de simplificación y optimización para garantizar su aplicabilidad práctica.
3. **Impacto de la gestión:** Además de los factores climáticos, la gestión sostenible de los sotos de castaño es crucial para mitigar riesgos y optimizar la producción. La implementación de riego eficiente y el control de plagas debe ser prioritaria para minimizar pérdidas.
4. **Limitaciones del trabajo:** La falta de series estadísticas homogéneas y datos sobre variables bióticas como plagas y enfermedades limita la capacidad predictiva del modelo. La incorporación de estos factores podría mejorar significativamente los resultados.
5. **Aplicaciones prácticas:** Los resultados obtenidos tienen implicaciones directas para la planificación de la gestión y la gestión sostenible del cultivo del castaño productor de fruto, promoviendo decisiones que optimicen tanto la producción como la calidad del fruto.

7. Agradecimientos

Agradezco la realización de este trabajo a Flor Álvarez Taboada y a Ramón Álvarez



de la Universidad de León por animarme a profundizar mis conocimientos en el ámbito de la geoinformática y ayudarme a su realización. A los castañicultores que desinteresadamente han proporcionado los datos de producción. A Cesefor por proporcionarme los medios para llevarlo a cabo y a mi familia por renunciar al tiempo que ha implicado su realización.

8. Bibliografía

BOUNOUS, G.; 2002a. Il castagno: coltura, ambiente de utilizzazione in Italia e en el mondo. Ed. Agricole, Bologna, Italy.

BREUSCH, T. S.; PAGAN, A. R.; 1979. A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. *Econometrica*, 47(5), 1287–1294.

CESARACCIO, C.; DUCE, P.; SNYDER, R. L.; 2001. An improved model for determining degree-day values from daily temperature data. *Biometeorology*, 45, 161–169.

DINIS, L. T.; PEIXOTO, F.; PINTO, T.; COSTA, R.; BENNETT, R. N.; GOMES-LARANJO, J.; 2011. Study of morphological and phenological diversity in chestnut trees (“Judia” variety) as a function of temperature sum. *Environmental and Experimental Botany*, 70, 110–120.

FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J.; ZAS, R.; DÍAZ, R.; VILLANI, F.; CHERUBINI, M.; ARAVANOPOULOS, F. A.; ALIZOTI, P. G.; ERIKSSON, G.; BOTTA, R.; MELLANO, M. G.; 2005. Geographic variability among extreme European wild chestnut populations. *Acta Horticulturae*, 693, 181–186.

GHEZI, E.; KHODAPARAST, S. A.; ZARE, R.; 2010. Distribution and severity of damage by *Cryphonectria parasitica* in the chestnut stands in Guilan province, Iran. *Forest Pathology*, 40, 450–457.

GOMES-LARANJO, J.; PEIXOTO, F.; SANG, H. W. W. F.; 2006. Study of the temperature effect in three chestnut (*Castanea sativa* Mill.) cultivars’ behaviour. *Journal of Plant Physiology*, 163, 945–955.

HEINIGER, U.; CONEDERA, M.; 1992. Chestnut forests and chestnut cultivation in Switzerland. In: *Proceedings of the International Chestnut Conference*, West Virginia University, Morgantown, 10–14 July 1992, 175–178.

PEREIRA, M.; CALHEIROS, T.; PINTO, J.; CAMELO, L.; 2013. Assessing potential changes of weather-related risk on chestnut productivity. *Environmental Research Letters*, 8(3), 1–6.



PORTELA, E.; ARANHA, J.; MARTINS, A.; PIRES, A. L.; 1999. Soil factors, farmers' practices and chestnut ink disease: Some interactions. *Acta Horticulturae*, 494, 433–441.

R CORE TEAM; 2023. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

VILLANUEVA, B. G.; 2021. nortest: Tests for Normality. R package version 1.1-2. <https://CRAN.R-project.org/package=nortest>.

WICKHAM, H.; 2017. corrr: Correlation matrix. R package version 0.3.3. <https://cran.r-project.org/package=corrr>.

WICKHAM, H.; AVERICK, M.; BRYAN, J.; CHANG, W.; MCGOWAN, L.; FRANÇOIS, R.; ... & YUTANI, H.; 2019. Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>.

WILCZYNSKI, S.; PODLASKI, R.; 2007. The effect of climate on radial growth of horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) in the Swietokrzyski National Park in central Poland. *Journal of Forest Research*, 12, 24–33.