



Modelación dinámica del rendimiento del palto Hass bajo riego tecnificado en Perú: efectos de la edad, altitud y densidad de plantación

Dynamic yield modeling of Hass avocado under technified irrigation in Peru: effects of age, altitude, and planting density

Martin Palomino-C^{1*}; Yiem Ataucusi¹

¹ Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Perú.

ORCID de los autores:

M. Palomino-C: <https://orcid.org/0000-0002-4297-9099>

Y. Ataucusi: <https://orcid.org/0000-0002-7942-9787>

RESUMEN

Este estudio estimó una función de producción dinámica del cultivo de palto Hass (*Persea americana* Mill.) en Perú mediante un modelo econométrico log-lineal, con el objetivo de caracterizar el rendimiento en función de la edad e incorporar los efectos de la altitud y la densidad de plantación bajo riego tecnificado. Se utilizaron 34 observaciones de sistemas productivos comerciales, modelando el rendimiento por planta mediante un polinomio cúbico en la edad y transformaciones logarítmicas de la altitud y la densidad. El modelo presentó un ajuste satisfactorio ($R^2 = 0,76$), adecuados diagnósticos econométricos y buena capacidad predictiva. Los resultados evidenciaron una trayectoria sigmoideal del rendimiento con fases de establecimiento, crecimiento acelerado y madurez con declive fisiológico. El máximo rendimiento biológico se ubicó entre 15,2 y 15,9 años, mientras que el óptimo técnico ocurrió entre 13,8 y 14,7 años. La densidad redujo el rendimiento individual por competencia intraespecífica, mientras que la altitud incrementó el nivel productivo sin modificar la forma funcional de la curva. Se concluye que la edad determina la trayectoria temporal del rendimiento, mientras que la altitud y la densidad modulan el nivel de producción.

Palabras clave: función de producción; econometría agrícola; eficiencia productiva; análisis dinámico.

ABSTRACT

This study estimated a dynamic production function for Hass avocado (*Persea americana* Mill.) in Peru using a log-linear econometric model, with the objective of characterizing yield as a function of crop age and incorporating the effects of altitude and planting density under technified irrigation conditions. A total of 34 observations from commercial production systems were used, modeling yield per plant through a cubic polynomial in age and logarithmic transformations of altitude and planting density. The model showed a satisfactory fit ($R^2 = 0.76$), appropriate econometric diagnostics, and good predictive performance. The results revealed a sigmoidal yield trajectory with phases of establishment, accelerated growth, and maturity with physiological decline. The biological maximum yield occurred between 15.2 and 15.9 years, whereas the technical optimum was reached between 13.8 and 14.7 years. Planting density reduced individual yield due to intraspecific competition, while altitude increased the production level without modifying the functional form of the curve. It is concluded that crop age determines the temporal trajectory of yield, whereas altitude and planting density modulate the production level.

Keywords: production function; agricultural econometrics; productive efficiency; dynamic analysis.

1. Introducción

El cultivo de palto Hass se ha consolidado como una de las actividades frutícolas más dinámicas del comercio agroalimentario internacional, impulsado por la creciente demanda en mercados de alto valor como Estados Unidos, Países Bajos, España y Asia. Este dinamismo ha posicionado al cultivo como estratégico para economías exportadoras, particularmente en países con creciente inserción en mercados agroalimentarios internacionales (FAO, 2022). En este contexto, Perú se ha consolidado como uno de los principales exportadores mundiales, destacando por su capacidad de abastecer ventanas comerciales complementarias y por la expansión sostenida de nuevas áreas productivas orientadas al mercado externo (MIDAGRI, 2024; ProHass, 2024). Este crecimiento ha estado acompañado por un proceso de intensificación tecnológica, reflejado en la adopción de riego presurizado, manejo nutricional de precisión y tecnificación de labores culturales. No obstante, la productividad y sostenibilidad del cultivo no dependen únicamente del nivel tecnológico, sino de su interacción con factores estructurales como la edad de la plantación, la densidad de siembra y las condiciones agroecológicas asociadas a la altitud (Whiley et al., 2013; Ramírez-Gil et al., 2019).

En cultivos perennes, la edad de la planta constituye uno de los principales factores asociados a la dinámica del rendimiento, caracterizada por una trayectoria no lineal que incluye fases de establecimiento, crecimiento acelerado, madurez y declive fisiológico. Esta relación limita el uso de aproximaciones lineales simples para representar adecuadamente el comportamiento productivo (Salazar-García et al., 2006; Whiley et al., 2013). Por su parte, la densidad de plantación condiciona la intensidad de uso del suelo y el grado de competencia intraespecífica, generando un trade-off entre rendimiento por planta y productividad por hectárea (Wilkie et al., 2019). Asimismo, la altitud constituye un factor agroclimático relevante que influye sobre la temperatura, radiación y disponibilidad hídrica, condicionando el desempeño productivo del cultivo (Whiley et al., 2013; Kourgialas & Dokou, 2021).

A pesar de su relevancia económica, en Perú la evidencia empírica presenta limitaciones, ya que los estudios suelen analizar estos factores de manera aislada y son escasos los enfoques integrados que modelen la dinámica productiva incorporando simultáneamente edad, densidad y

altitud dentro de un marco econométrico (Quispe-Rodríguez et al., 2024; Forero et al., 2025). Esta limitación restringe la capacidad de derivar indicadores clave como el máximo rendimiento biológico y el óptimo técnico, fundamentales para la toma de decisiones productivas.

En este contexto, el objetivo de este estudio es estimar una función de producción dinámica del palto Hass en el Perú, incorporando la edad del cultivo, la altitud y la densidad de plantación en sistemas bajo riego tecnificado, con el fin de caracterizar la estructura temporal del rendimiento y derivar indicadores de eficiencia productiva como el máximo rendimiento biológico y el óptimo técnico mediante un modelo econométrico semilogarítmico con estructura polinómica dinámica.

Se plantea la hipótesis de que la edad determina la forma funcional de la trayectoria productiva, mientras que la altitud y la densidad de plantación actúan principalmente como factores de desplazamiento del nivel de producción, sin modificar de manera sustantiva la dinámica temporal del ciclo biológico.

A diferencia de estudios previos que analizan la edad, la altitud o la densidad de plantación por separado, este estudio modela conjuntamente su interacción dinámica dentro de un marco econométrico no lineal unificado, permitiendo la estimación simultánea de los umbrales de producción biológicos y técnicos bajo condiciones de riego tecnificado.

2. Metodología

2.1. Enfoque del estudio

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con diseño no experimental de tipo *ex post facto*, orientado a estimar funciones de producción en cultivos perennes. Se empleó un modelo econométrico semilogarítmico (Anexo B) con estructura polinómica dinámica, adecuado para capturar relaciones no lineales, efectos de saturación y dinámicas dependientes de la edad del cultivo (Just et al., 2004; Wooldridge, 2020).

El modelo incorpora un polinomio cúbico en la edad y transformaciones logarítmicas de la altitud y la densidad de plantación, lo que permite interpretar los coeficientes como elasticidades y efectos marginales (Greene, 2018).

Con el fin de controlar la heterogeneidad asociada al manejo hídrico, se incluyeron únicamente unidades productivas con riego tecnificado (goteo o microaspersión), mejorando la comparabilidad entre observaciones (Kourgialas & Dokou, 2021; Whiley et al., 2013; Quispe-Rodríguez et al., 2024).

2.2. Ámbito de estudio

El análisis se circunscribe a sistemas productivos de palto Hass en Perú, incluyendo zonas costeras e interandinas bajo manejo comercial. El rango altitudinal considerado abarca desde el nivel del mar hasta aproximadamente 2 800 m s. n. m., cubriendo los principales pisos agroecológicos asociados al cultivo comercial de palto Hass en sistemas irrigados (Whiley et al., 2013; Ramírez-Gil et al., 2019).

La delimitación espacial (Figura 1) se elaboró a partir de información topográfica de la base CIAT-CSI SRTM (Jarvis et al., 2008).

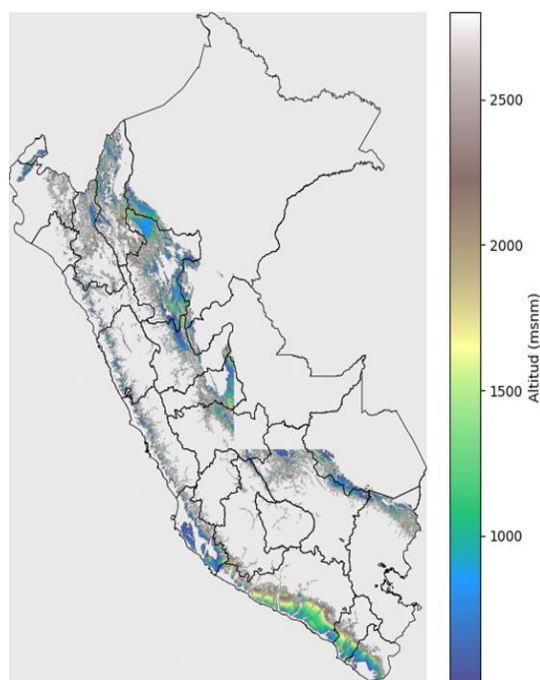


Figura 1: Delimitación de la zona principal óptima para la producción de palto Hass bajo riego tecnificado en el Perú (500–2 800 m s. n. m.).

2.3. Fuente de datos

La base de datos se construyó a partir de información secundaria proveniente de reportes técnicos, estudios científicos y registros productivos de sistemas de palto Hass en América del Sur, con énfasis en Perú.

Los datos fueron depurados y estandarizados para asegurar consistencia en unidades, plausibilidad agronómica y comparabilidad. Se excluyeron registros incompletos o asociados a sistemas sin riego tecnificado.

La muestra final estuvo conformada por 34 observaciones. Aunque de tamaño moderado, se priorizó la homogeneidad técnica de las unidades analizadas, fortaleciendo la validez interna del estudio (Wooldridge, 2020). La base consolidada se presenta en el Anexo A.

Aunque el tamaño de la muestra es moderado, la especificación del modelo priorizó la interpretabilidad biológica y la consistencia estructural por encima de la selección de variables puramente basada en datos. La estructura no lineal conservada refleja la dinámica de crecimiento fisiológico del cultivo de palto y sigue un enfoque de especificación jerárquica parsimoniosa comúnmente recomendado en econometría aplicada.

La base de datos debe interpretarse como un conjunto transversal agrupado (*pooled cross-sectional dataset*) construido a partir de sistemas productivos técnicamente comparables, más que como un meta-análisis formal. El objetivo fue estimar relaciones estructurales de producción bajo condiciones homogéneas de manejo y no sintetizar tamaños de efecto provenientes de experimentos independientes.

2.4. Variables

La variable dependiente fue: Rendimiento (y): producción anual por planta (kg/planta).

Variables explicativas: Edad: años desde el establecimiento; Altitud: metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.); y, Densidad: plantas por hectárea (plantas/ha).

Para el análisis econométrico, las variables fueron centradas respecto a su media. La edad se modeló mediante términos lineal, cuadrático y cúbico, mientras que altitud y densidad se incorporaron en forma logarítmica.

2.5. Especificación del modelo

Se especifica una función de producción dinámica semilogarítmica con estructura polinómica de tercer orden, consistente con formas funcionales flexibles tipo función de producción dinámica, lo que permite aproximar trayectorias no lineales con asimetría y puntos de inflexión en el ciclo productivo de cultivos perennes. Este enfoque es consistente con desarrollos modernos en econometría aplicada y modelación de sistemas productivos heterogéneos (Greene, 2018; Wooldridge, 2020; Cameron & Trivedi, 2010).

La relación general se expresa como:

$$Y_i = f(\text{edad}_i, \text{alt}_i, \text{den}_i, \varepsilon_i) \quad (1)$$

Donde y_i : rendimiento por planta de la observación i ; $\text{edad}_{c,i}$: edad centrada respecto a su media muestral; $\ln(\text{alt})_{c,i}$: logaritmo centrado de la altitud; $\ln(\text{den})_{c,i}$: logaritmo centrado de la densidad; ε_i : término aleatorio.

La especificación estimada es:

$$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \text{edad}_c + \beta_2 \text{edad}_c^2 + \beta_3 \text{edad}_c^3 + \beta_4 \ln(\text{alt})_c + \beta_5 \ln(\text{den})_c + \beta_6 (\text{edad}_c \cdot \ln(\text{alt})_c) + \beta_7 (\text{edad}_c \cdot \ln(\text{den})_c) + \varepsilon \quad (2)$$

Aunque algunos términos polinomiales e interacciones no resultaron individualmente significativos, se mantienen en la especificación por consistencia estructural y biológica, respetando el principio de jerarquía en modelos con interacciones. En cultivos perennes, las especificaciones no lineales se encuentran teóricamente justificadas, debido a que la productividad evoluciona a través de fases de establecimiento, expansión, madurez y senescencia, las cuales no pueden representarse adecuadamente mediante estructuras estrictamente lineales (Just et al., 2004; Whiley et al., 2013). Asimismo, la retención de términos polinomiales e interacciones siguió el principio de especificación jerárquica (hierarchical specification principle), ampliamente recomendado en modelos no lineales y de interacción, según el cual los términos de orden inferior deben mantenerse para preservar la coherencia funcional e interpretativa de la especificación econométrica (Harrell, 2015; Aiken et al., 1991). Esta formulación permite capturar tanto la dinámica no lineal del rendimiento como los efectos diferenciales de la altitud y la densidad a lo largo del ciclo productivo.

2.6. Estimación y validación

Los parámetros se estimaron mediante Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS), empleando errores estándar robustos tipo HC3, adecuados para muestras pequeñas y para posibles problemas de heterocedasticidad. La corrección HC3 es particularmente apropiada en contextos de tamaño muestral reducido, ya que reduce el sesgo de muestra finita en la estimación de la matriz de varianza-covarianza (Long & Ervin, 2000; Wooldridge, 2020).

Dado el carácter transversal agrupado de la base de datos, se descarta el uso de estimadores HAC tipo Newey–West, evitando inconsistencias en la inferencia asociadas a supuestos de dependencia temporal no presentes en la estructura de los datos.

La calidad del ajuste se evaluó mediante indicadores estándar en econometría aplicada (Gujarati & Porter, 2010; Cameron & Trivedi, 2022): Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}); Error cuadrático medio (RMSE); Significancia global (estadístico F); Diagnósticos de residuos. Además de los coeficientes estimados y sus pruebas de significancia, se calcularon intervalos de confianza al 95% para evaluar la precisión de las estimaciones y la robustez de los parámetros del modelo.

Adicionalmente, se evaluó la presencia de multicolinealidad mediante factores de inflación de la varianza (VIF), dada la inclusión de términos polinomiales e interacciones.

2.7. Derivación de indicadores

A partir del modelo estimado se derivaron los siguientes indicadores:

a) Dinámica del rendimiento

$$\frac{d\ln(y)}{dedad} = \beta_1 + 2\beta_2 edad_c + 3\beta_3 edad_c^2 + \beta_6 \ln(alt)_c + \beta_7 \ln(den)_c \quad (3)$$

$$PMg = y \cdot \frac{d\ln(y)}{dedad} \quad (4)$$

b) Edad de máximo rendimiento biológico

$$edad_{bio}^* = \arg \max y(edad) \quad (5)$$

c) Edad óptimo técnico

Definida cuando:

$$PMg = PMe \quad (6)$$

d) Punto de inflexión

$$\frac{d^2 \ln(y)}{dedad^2} = 2\beta_2 + 6\beta_3 edad_c = 0 \quad (7)$$

e) Simulación de escenarios

Se evaluaron combinaciones de:

- Altitud: baja, media y alta
- Densidad: baja, media y alta

permitiendo analizar la sensibilidad del sistema productivo.

2.8. Análisis computacional

El procesamiento estadístico y la simulación de escenarios se realizaron en lenguaje Python, utilizando librerías especializadas para análisis numérico, econometría y visualización, tales como pandas, numpy, statsmodels y matplotlib. Estas herramientas son ampliamente empleadas en investigación científica por su capacidad de reproducibilidad y flexibilidad analítica (McKinney, 2022; Seabold & Perktold, 2010).

3. Resultados y discusión

3.1 Desempeño global del modelo

La estimación de la función de producción dinámica no lineal muestra un ajuste sólido frente a los datos observados. El coeficiente de determinación alcanza un valor de $R^2 = 0,76$, con un R^2 ajustado de 0,694, lo que implica que entre el 69 % y el 76 % de la variabilidad del rendimiento por planta es explicada por las variables incluidas en el modelo. Este nivel de ajuste es consistente con lo esperado en aplicaciones econométricas sobre sistemas agronómicos caracterizados por heterogeneidad estructural (Wooldridge, 2020; Cameron & Trivedi, 2022).

De manera complementaria, la prueba F global resulta altamente significativa ($p < 0,0001$), lo que respalda la relevancia conjunta de los regresores y respalda la validez estadística de la especificación (Gujarati & Porter, 2010).

3.2 Estimación e interpretación de coeficientes

Los coeficientes estimados (Tabla 1) revelan una estructura productiva consistente con la teoría biológica de cultivos perennes, en la que el rendimiento evoluciona de manera no lineal a lo largo del ciclo de vida del cultivo (Ramírez-Gil et al., 2019).

El polinomio cúbico en la edad permite capturar de forma precisa la dinámica sigmoide del rendimiento:

- El término lineal ($\beta_1 = 0,176$) es positivo y significativo, reflejando la fase inicial de crecimiento.
- El término cuadrático ($\beta_2 = 0,0015$) contribuye a reproducir la trayectoria biológica no lineal del rendimiento a lo largo del ciclo de vida del cultivo.
- El término cúbico ($\beta_3 = -0,0015$) incorpora la desaceleración y el eventual declive asociado al envejecimiento.

En conjunto, estos términos reproducen una trayectoria biológica caracterizada por crecimiento inicial, expansión acelerada, saturación y posterior senescencia, coherente con la evidencia agronómica disponible (Kourgialas & Dokou, 2021; Whiley et al., 2013).

En cuanto a los factores estructurales, la altitud presenta un efecto positivo y estadísticamente significativo al 10% ($\beta_4 = 0,279$), lo que indica que, bajo condiciones de riego tecnificado, mayores niveles altitudinales se asocian con incrementos en el rendimiento por planta. Este resultado es consistente con la evidencia que destaca el rol de la altitud en la regulación térmica, radiativa y fisiológica del cultivo (Ramírez-Gil et al., 2019; Whiley et al., 2013). Dado que la variable se especifica en logaritmos centrados, el coeficiente puede interpretarse como una semi-elasticidad respecto a desviaciones de la media: variaciones proporcionales en la altitud se traducen en cambios porcentuales en el rendimiento, manteniendo constantes los demás factores.

En el caso de la densidad de plantación, el coeficiente estimado es negativo y estadísticamente significativo ($\beta_5 = -0,509$), lo que evidencia la presencia de competencia intraespecífica por recursos limitantes como luz, agua y nutrientes, fenómeno ampliamente documentado en sistemas intensivos de frutales (Kourgialas &

Dokou, 2021; Whiley et al., 2013). Al estar la variable en forma logarítmica, su interpretación corresponde a una elasticidad: un incremento del 10% en la densidad de plantación se asocia, en promedio, con una reducción aproximada del 5,1% en el rendimiento por planta, *Ceteris paribus*. Las interacciones edad-altitud ($\beta_6 = 0,034$) y edad-densidad ($\beta_7 = 0,006$), aunque de menor magnitud, permiten capturar ajustes dinámicos en los efectos principales, reforzando la naturaleza no lineal del sistema (Greene, 2018).

Tabla 1

Resultados de la estimación de la función de producción dinámica no lineal

Variable	Coeficiente	Error estándar	t	p-value
Intercepto	3,4556	0,1585	21,80	<0,001
edad_c	0,1759	0,0792	2,22	0,035
edad ² _c	0,0015	0,0080	0,19	0,854
edad ³ _c	-0,0015	0,0017	-0,87	0,393
ln_alt_c	0,2788	0,1572	1,77	0,088
ln_den_c	-0,5094	0,2334	-2,18	0,038
edad × ln_alt_c	0,0336	0,0352	0,95	0,349
edad × ln_den_c	0,0060	0,0761	0,08	0,937

Nota: Intervalos de confianza estimados al 95 % mediante errores estándar robustos. Los términos polinomiales fueron retenidos para preservar la estructura dinámica y la consistencia biológica de la función de producción.

Aunque algunos coeficientes polinomiales e interacciones no alcanzaron significancia estadística individual, su inclusión permitió mantener la coherencia funcional y biológica de la trayectoria productiva estimada. La permanencia de estos términos contribuye a reproducir adecuadamente la forma sigmoide característica de cultivos perennes, evitando sesgos de especificación asociados a modelos excesivamente restrictivos. Asimismo, la significancia global del modelo y su desempeño predictivo respaldan la validez de la especificación adoptada.

3.3 Diagnóstico del modelo

Los resultados de los tests econométricos respaldan la validez de la especificación:

Autocorrelación: El estadístico de Durbin-Watson (1,70) indica ausencia de autocorrelación severa (Wooldridge, 2020).

Heterocedasticidad: La prueba de Breusch-Pagan no rechaza homocedasticidad ($p = 0,10$) (Cameron & Trivedi, 2010).

Normalidad: La prueba de Jarque-Bera no rechaza el supuesto de normalidad de los residuos ($p = 0,89$) (Gujarati & Porter, 2010).

Multicolinealidad: Los valores de VIF se mantienen por debajo del umbral crítico, lo que indica ausencia de problemas severos de multicolinealidad (James et al., 2021). Estos resultados indican que los supuestos clásicos del modelo lineal son razonablemente satisfechos.

3.4 Validación predictiva

La capacidad predictiva del modelo fue evaluada mediante validación fuera de muestra.

- RMSE de entrenamiento: 24,0 kg/planta
- RMSE de validación: 25,8 kg/planta

La proximidad entre ambos valores (ratio = 1,07) indica una buena capacidad de generalización y ausencia de sobreajuste, criterio fundamental en modelos aplicados (James et al., 2021).

3.5 Dinámica productiva

La aplicación del modelo estimado permite un análisis detallado de la dinámica productiva del palto Hass bajo distintas condiciones. El modelo reproduce de manera robusta la forma sigmoide característica del crecimiento biológico de un cultivo perenne, ampliamente documentada en la literatura agronómica (Whiley et al., 2013; Ramírez-Gil et al., 2019):

Fase I: Establecimiento Juvenil ($\approx$ 2–6 años): Rendimientos bajos y crecimiento lento, donde la planta destina energía principalmente al desarrollo vegetativo y radicular.

Fase II: Crecimiento Acelerado ($\approx$ 6–14 años): Período de máxima productividad marginal (PMg). El rendimiento aumenta a una tasa creciente, alcanzando el punto de inflexión hacia el final de esta fase.

Fase III: Madurez y Declive ($\approx$ 15–20 años): Fase de desaceleración y posterior declive productivo, capturada por el término cúbico negativo. El rendimiento se estabiliza en un máximo (máximo rendimiento biológico) y luego comienza a decrecer lentamente debido a factores de senescencia y mayor susceptibilidad a plagas y enfermedades.

Las curvas representan la trayectoria estimada del rendimiento por planta bajo distintos escenarios productivos. Los puntos negros indican la edad de máximo rendimiento biológico, los puntos morados corresponden a la edad óptima técnico y los puntos rojos señalan el punto de inflexión de la función de producción.

3.6 Máximo rendimiento biológico y óptimo técnico

El análisis permite una distinción crucial, tanto conceptual como numérica, entre estos dos puntos. El máximo rendimiento biológico (punto de máximo rendimiento físico) se sitúa, según el modelo, alrededor de los 15,2 y 15,9 años. Sin embargo, el óptimo técnico, dictado por la ley de rendimientos marginales decrecientes, ocurre antes, aproximadamente entre los 13,8 y 14,7 años. Esta distinción es fundamental para las decisiones de renovación de huertos. Mantener el cultivo más allá del óptimo técnico, aunque aún se obtengan rendimientos físicos altos, puede resultar en una rentabilidad decreciente, ya que los costos de mantenimiento y manejo continúan mientras el rendimiento adicional (marginal) generado por cada año adicional se reduce.

La distinción entre máximo rendimiento biológico y óptimo técnico es consistente con la teoría microeconómica de la producción, donde el óptimo técnico ocurre antes del máximo físico debido a rendimientos marginales decrecientes (Varian, 2019; Just et al., 2004).

3.7. Efectos de densidad y altitud

Se observa un trade-off entre rendimiento por planta y productividad por hectárea:

Baja densidad (200 plantas/ha): mayor rendimiento individual

Alta densidad (500 plantas/ha): menor rendimiento por planta, mayor producción por superficie

La altitud actúa como un factor de desplazamiento de la función de producción, incrementando el nivel de rendimiento sin modificar su forma temporal. Esta disyuntiva obliga al productor a tomar una decisión estratégica: priorizar la eficiencia individual de los árboles (que puede traducirse en menores costos de manejo por planta y fruta de mayor calibre) o la productividad total del terreno (maximizando el retorno por hectárea, aunque con mayores costos iniciales de establecimiento). Los resultados evidencian un trade-off estructural entre rendimiento por planta y productividad por hectárea, coherente con la teoría de competencia intraespecífica y manejo de densidad en frutales (Wilkie et al., 2019).

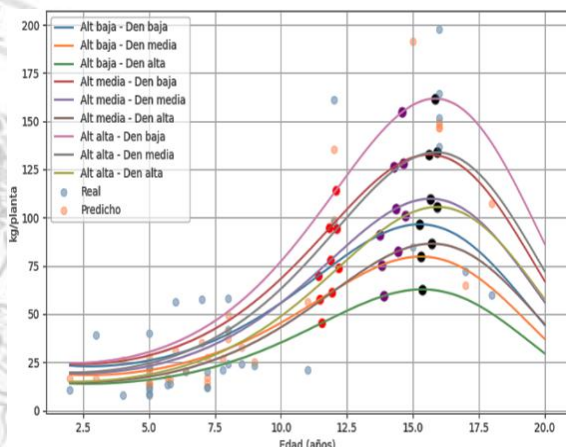


Figura 2: Curvas de rendimiento del palto Hass según edad, altitud y densidad de plantación.

Los resultados sintetizados en la Tabla 2 revelan que, mientras la altitud y la densidad modifican considerablemente el nivel absoluto del rendimiento (con diferencias superiores al 100 % entre escenarios extremos), su impacto en la edad a la que se alcanza el pico productivo (máximo rendimiento biológico) es mínimo.

La edad correspondiente al máximo rendimiento biológico mostró una notable estabilidad entre escenarios productivos, oscilando únicamente entre 15,2 y 15,9 años bajo distintas combinaciones de altitud y densidad de plantación. De manera similar, la edad asociada al óptimo técnico se mantuvo en un rango estrecho de 13,8 y 14,7 años. Estos resultados sugieren que tanto las decisiones de manejo agronómico (densidad de plantación) como las condiciones agroecológicas (altitud) inciden principalmente sobre la magnitud del rendimiento alcanzado, pero ejercen una influencia limitada sobre el momento en que ocurre el pico productivo. En consecuencia, la temporalidad del máximo rendimiento parecería estar determinada en mayor medida por factores fisiológicos intrínsecos del cultivo.

En todos los escenarios analizados, los sistemas de baja densidad registraron mayores niveles de producción expresados en kilogramos por planta, mientras que los sistemas de alta densidad presentaron menores rendimientos individuales. Este comportamiento es consistente con procesos de competencia intraespecífica por recursos esenciales, tales como luz, agua y nutrientes. No obstante, desde una perspectiva de productividad territorial, las densidades elevadas podrían maximizar la producción por hectárea, mientras que las densidades reducidas optimizan la productividad por planta.

Respecto al gradiente altitudinal, los resultados evidencian menores niveles de rendimiento en altitudes bajas e intermedias, mientras que en altitudes elevadas se alcanzan los mayores

valores de producción por planta. Ello indica que la altitud actúa como un factor estructural de la productividad del palto Hass, probablemente a través de diferencias en temperatura, amplitud térmica, radiación solar y disponibilidad hídrica.

La edad óptima técnico se ubicó sistemáticamente entre 1,3 y 1,5 años antes del máximo rendimiento biológico, lo cual confirma que la maximización técnica precede al máximo fisiológico del cultivo. Asimismo, se observó una ligera tendencia al incremento de la edad óptima conforme aumenta la altitud, sugiriendo que en ambientes de mayor productividad el ciclo económicamente eficiente se extiende marginalmente en el tiempo.

En términos funcionales, la altitud desplaza la función de producción hacia niveles superiores sin modificar sustancialmente su forma general, mientras que la densidad de plantación introduce un efecto de competencia que reduce el rendimiento individual. Este efecto resulta más pronunciado en zonas de mayor altitud, donde el costo de oportunidad asociado a la sobre-densificación es más elevado debido al mayor potencial productivo del entorno.

3.8 Interacción altitud–densidad

La interacción entre altitud y densidad revela que los sistemas de alta productividad son más sensibles a decisiones ineficientes de manejo. En consecuencia, las estrategias óptimas de establecimiento y renovación de huertos deberían considerar densidades relativamente menores en zonas altoandinas, con el fin de aprovechar de manera más eficiente la frontera productiva disponible.

La interacción evidencia que sistemas con mayor potencial productivo son más sensibles a decisiones de manejo subóptimas, lo cual es consistente con el concepto de frontera de producción y eficiencia técnica (Coelli et al., 2005).

Tabla 2
Máximo productivo y óptimo técnico bajo distintos escenarios

Escenario	Altitud (m.s.n.m.)	Densidad (pl/ha)	Edad máx. prod. (años)	Rend. máx. (kg/planta)	Edad óptimo técnico (años)	Rend. óptimo (kg/planta)
Baja alt – Baja densidad	800	200	15,24	96,55	13,76	91,22
Baja alt – Media densidad	800	300	15,30	79,81	13,82	75,49
Baja alt – Alta densidad	800	500	15,36	62,80	13,91	59,48
Media alt – Baja densidad	1 500	200	15,61	132,73	14,30	126,48
Media alt – Media densidad	1 500	300	15,67	109,82	14,35	104,73
Media alt – Alta densidad	1 500	500	15,73	86,51	14,43	82,58
Alta alt – Baja densidad	2 200	200	15,85	161,74	14,59	154,74
Alta alt – Media densidad	2 200	300	15,91	133,88	14,65	128,19
Alta alt – Alta densidad	2 200	500	15,91	105,54	14,72	101,13

Se presentan superficies de respuesta del rendimiento del palto Hass (kg/planta) en función simultánea de la edad del cultivo y la altitud, diferenciadas por tres niveles de densidad de plantación: baja (200 plantas/ha), media (300 plantas/ha) y alta (500 plantas/ha) (Figura 3). En conjunto, muestran patrones altamente consistentes y permiten identificar efectos estructurales claros de la altitud y la densidad sobre la productividad.

La interacción revela que: (a) La penalización por alta densidad es mayor en zonas de alta altitud. (b) El costo de oportunidad de sobre-densificar aumenta con el potencial productivo. Esto implica que sistemas más productivos son también más sensibles a decisiones subóptimas.

3.9. Implicancias productivas

Desde una perspectiva de manejo:

- (a) Baja densidad: maximiza rendimiento por planta y sería preferible en zonas altoandinas de alto potencial.
- (b) Densidad media: equilibrio entre rendimiento individual y ocupación del terreno.

- (c) Alta densidad: puede aumentar producción total por hectárea en etapas tempranas, pero reduce el rendimiento unitario y podría acelerar problemas de competencia estructural.

Los resultados son consistentes con recomendaciones agronómicas para el manejo de huertos de palto Hass, donde la densidad y la altitud deben optimizarse según objetivos productivos, disponibilidad hídrica y condiciones agroecológicas locales (Kourgialas & Dokou, 2021; Whiley et al., 2013).

3.10. Discusión

Integración con la literatura

Los resultados son consistentes con la evidencia agronómica y económica sobre cultivos perennes. La trayectoria sigmoide estimada es consistente con las fases de establecimiento, crecimiento, madurez y declive reportadas para el palto Hass (Salazar-García et al., 2006; Whiley et al., 2013; Ramírez-Gil et al., 2019). Asimismo, la especificación cúbica respalda la pertinencia de enfoques no lineales para modelar dinámicas productivas, en línea con desarrollos recientes en econometría agrícola (Martínez-Castañeda et al., 2022).

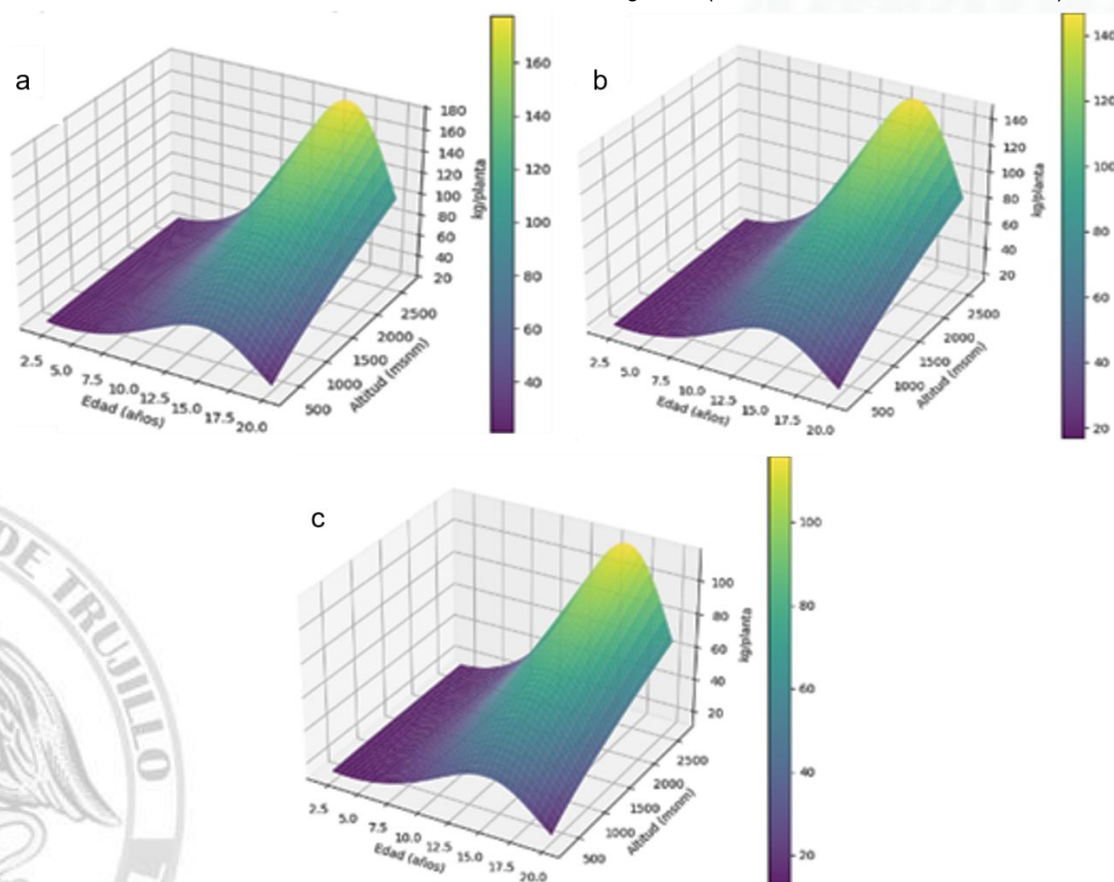


Figura 3. Superficies de respuesta del rendimiento del palto Hass en función de la edad y la altitud, bajo distintos niveles de densidad de plantación. (a) Densidad baja (200 plantas/ha), (b) densidad media (300 plantas/ha) y (c) densidad alta (500 plantas/ha). Las superficies representan el rendimiento estimado por planta (kg/planta) a partir del modelo econométrico, evidenciando el efecto conjunto de la edad del cultivo y la altitud bajo diferentes configuraciones de densidad.

El efecto negativo de la densidad sobre el rendimiento por planta y el efecto positivo de la altitud coinciden con la literatura internacional. Sin embargo, el aporte central del estudio radica en estimar estos efectos de manera conjunta, evidenciando su interacción dentro de una misma función de producción.

Control fisiológico y estructura de la función de producción

Un resultado clave es la estabilidad de la edad de máximo rendimiento frente a variaciones en densidad y altitud. Esto sugiere que la dinámica temporal del rendimiento estaría principalmente asociada por factores fisiológicos intrínsecos, mientras que las variables estructurales operan principalmente como desplazadores de nivel.

En términos analíticos, la “edad” determina la forma de la función; y la “altitud y densidad” modifican el nivel de producción. Este hallazgo es coherente con estudios que indican que prácticas de manejo alteran magnitudes productivas, pero no la forma funcional de la curva de rendimiento (Moraes et al., 2022).

Los resultados sugieren una separación estructural entre la dinámica temporal del rendimiento y sus determinantes de nivel. La edad del cultivo define la trayectoria intertemporal del sistema productivo, mientras que la altitud y la densidad operan como variables de desplazamiento vertical de la función de producción. Este patrón es consistente con una estructura de tipo “state-scale separation”, en la que los determinantes biológicos gobiernan la forma funcional del ciclo productivo, mientras que los factores agroecológicos determinan su escala de rendimiento.

En este sentido, la evidencia respalda que la dinámica del cultivo está dominada por restricciones fisiológicas internas, mientras que las condiciones del entorno modulan el nivel de productividad alcanzable.

Densidad de plantación y eficiencia

La relación negativa entre densidad y rendimiento individual confirma la existencia de competencia intraespecífica por recursos. No obstante, su interpretación es necesariamente económica: la densidad introduce un trade-off entre rendimiento por planta y producción por hectárea.

En este contexto, la elección de densidad depende de condiciones específicas del sistema productivo, incluyendo horizonte de inversión, costos y nivel tecnológico. Los resultados sugieren que, en horizontes de mediano y largo

plazo, densidades moderadas o bajas podrían ser más eficientes, especialmente en sistemas con alta capacidad productiva.

Altitud y frontera productiva

La altitud actúa como un determinante estructural que desplaza la función de producción hacia niveles superiores, sin alterar su forma. Este comportamiento es consistente con la literatura sobre sistemas andinos, donde condiciones térmicas y radiativas favorecen la productividad en determinados rangos altitudinales (Ramírez-Gil et al., 2019). Sin embargo, este efecto depende de la disponibilidad hídrica. Bajo condiciones sin riego tecnificado, las ventajas asociadas a la altitud pueden reducirse, lo que refuerza el carácter condicionado de este resultado.

Óptimo técnico versus máximo rendimiento biológico

Los resultados sugieren que el óptimo técnico ocurre antes del máximo rendimiento biológico, reflejando rendimientos marginales decrecientes. Este resultado tiene implicancias directas para la gestión de huertos, ya que maximizar producción física no necesariamente implica maximizar rentabilidad. En consecuencia, la planificación de renovación debe basarse en criterios económicos y no exclusivamente fisiológicos, especialmente en contextos de alta competencia y cambio tecnológico.

Interacción altitud–densidad

La interacción estimada indica que la penalización por altas densidades es mayor en zonas de mayor altitud. Esto sugiere que los sistemas con mayor potencial productivo son también más sensibles a decisiones de manejo ineficientes.

Desde una perspectiva económica, este resultado puede interpretarse como un incremento del costo de oportunidad asociado a configuraciones subóptimas, lo que refuerza la necesidad de estrategias diferenciadas según el entorno agroecológico.

Implicancias para el sector

Los resultados aportan evidencia para la toma de decisiones en el sector paltero peruano. En particular, sugieren: (a) priorizar zonas con ventajas altitudinales bajo riego tecnificado; (b) ajustar la densidad según el potencial productivo; e, (c) incorporar criterios económicos en la renovación de huertos. Estas recomendaciones

son relevantes en un contexto de expansión del cultivo y creciente competencia internacional.

Limitaciones

El estudio presenta limitaciones asociadas al tamaño muestral y al uso de datos observacionales. Asimismo, no se incorporaron variables como fertilización, tipo de suelo o manejo fitosanitario, que podrían influir en el rendimiento. Aunque el tamaño de la muestra es moderado, el estudio prioriza la homogeneidad técnica y la consistencia de los sistemas productivos bajo riego tecnificado. Por lo tanto, los resultados deben interpretarse como aproximaciones estructurales más que como estimaciones causales universales.

Adicionalmente, la posible dependencia intraestudio entre observaciones provenientes de una misma fuente no pudo ser completamente controlada debido a limitaciones de disponibilidad de información. En consecuencia, las relaciones estimadas deben interpretarse como aproximaciones estructurales más que como efectos estrictamente causales.

En consecuencia, los resultados deben interpretarse como relaciones estructurales consistentes, más que como estimaciones causales estrictas.

4. Conclusiones

El estudio estima una función de producción dinámica no lineal para el palto Hass en el Perú bajo sistemas de riego tecnificado, evidenciando que la edad del cultivo estructura la trayectoria temporal del rendimiento en forma sigmoideal, con un máximo rendimiento biológico estable entre 15,2 y 15,9 años.

La altitud y la densidad de plantación actúan como factores de nivel, desplazando la función de producción sin modificar significativamente su forma temporal. El óptimo técnico se ubica sistemáticamente antes del máximo rendimiento biológico, entre 13,8 y 14,7 años, reflejando la presencia de rendimientos marginales decrecientes. Los resultados sugieren una estructura productiva jerárquica en la que la dinámica fisiológica determina la forma del proceso productivo, mientras que las condiciones agroecológicas determinan su escala.

La edad aparece como el principal factor asociado a la dinámica productiva, mientras que la altitud y la densidad modifican el nivel de producción. Estos resultados pueden contribuir a orientar decisiones sobre densidad de plantación, localización del cultivo y renovación de huertos bajo criterios de eficiencia económica.

Se identifican oportunidades para profundizar el análisis mediante una ampliación de la base de datos, estimación de modelos de eficiencia técnica, incorporación de variables económicas (precios y costos), y uso de información climática de mayor resolución. Asimismo, resulta relevante explorar heterogeneidad regional dentro del Perú y realizar comparaciones internacionales.

Referencias bibliográficas

- Aiken, L. S., West, S. G., & Reno, R. R. (1991). *Multiple regression: Testing and interpreting interactions*. Sage Publications.
- Asociación de Productores y Exportadores de Palta Hass del Perú [PROHASS]. (2024). *Agromercado y PROHASS se unen para integrar a pequeños productores a la cadena exportadora*. Gobierno del Perú.
- Cameron, A. C., & Trivedi, P. K. (2010). *Microeconometrics using Stata* (Rev. ed.). Stata Press. Stata Press preview.
- Campos Paredes, E. E. (2025). *Manejo productivo del cultivo de palto (Persea americana Mill.) var. Hass en Chao, La Libertad* [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional de Trujillo.
- Coelli, T., Rao, D. S. P., O'Donnell, C., & Battese, G. (2005). *An introduction to efficiency and productivity analysis* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/b136381>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2022). *The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems*. FAO.
- Felles-Leandro, R. (2023). *Sustentabilidad de la producción orgánica de palto (Persea americana Mill.) en las provincias de Huaura y Barranca, Región Lima* [Tesis doctoral]. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.
- Felles-Leandro, D., & García-Bendezú, S. (2022). Factores físicos y técnicos que influyen en el rendimiento de palto orgánico (*Persea americana* Mill.) en Perú. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 38(3), 243–258. <https://doi.org/10.29393/CHJAA38-24FTDG20024>
- Greene, W. H. (2018). *Econometric analysis* (8th ed.). Pearson.
- Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2010). *Econometría* (5.ª ed.). McGraw-Hill.
- Harrell, F. E. (2015). *Regression modeling strategies: With applications to linear models, logistic and ordinal regression, and survival analysis* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19425-7>
- Huamán Berrio, H. R., & López Auquis, L. (2025). *Factores productivos y rentabilidad de la producción de palta Hass de la asociación frutícola de palta del distrito de Limatambo* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional UNSAAC.
- Jarvis, A., Guevara, E., Reuter, H. I., & Nelson, A. D. (2008). *Hole-filled SRTM for the globe version 4*. CGIAR Consortium for Spatial Information. CGIAR-CSI SRTM.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). *An introduction to statistical learning* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1418-1>
- Just, R. E., Hueth, D. L., & Schmitz, A. (2004). *The welfare economics of public policy*. Edward Elgar Publishing.
- Kourgialas, N. N., & Dokou, Z. (2021). Water management and salinity adaptation approaches of avocado trees. *Agricultural Water Management*, 252, 106923. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106923>
- Lemus, G., et al. (2005). *El cultivo del palto* (Boletín INIA N.º 129). Instituto de Investigaciones Agropecuarias. INIA Chile PDF.
- Long, J. S., & Ervin, L. H. (2000). Using heteroscedasticity consistent standard errors in the linear regression model. *The American Statistician*, 54(3), 217–224. <https://doi.org/10.1080/00031305.2000.10474549>
- Martínez-Castañeda, F. E., García-Matías, F., & Velázquez-Torres, A. L. (2022). Competitividad del cultivo de aguacate en México. *Terra Latinoamericana*, 40, e947. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.947>

- Mendoza Huamani, G. R., & Ochoa Candiotti, Y. N. (2021). *Mejora en el rendimiento del cultivo de palta Hass (Persea americana "Hass") mediante la instalación de un biodigestor en el Fundo Huachacmarán* [Tesis de licenciatura, Universidad de Lima]. Repositorio Institucional de la Universidad de Lima.
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI]. (2024, abril 4). *Exportación de palta superó las 36 mil toneladas en el primer bimestre de 2024*. Gobierno del Perú. MIDAGRI noticia
- Moraes, A. F. G., Micheletti, L. B., Santoro, M. B., Santos, N. T., Avilés, T. C., & Silva, S. R. (2022). Horticultural performance of 'Hass' avocado grafted onto seedling and clonal rootstocks under tropical wet-dry climate conditions. *Scientia Horticulturae*, 302, 111155. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111155>
- Newey, W. K., & West, K. D. (1987). A simple, positive semi-definite, heteroskedasticity and autocorrelation consistent covariance matrix. *Econometrica*, 55(3), 703–708. <https://doi.org/10.2307/1913610>
- Quispe-Rodríguez, J., Paytan-Montañez, T. C., & Aliaga-Barrera, I. N. (2024). Osmotic adjustment and yield of two avocado varieties under drip irrigation in Andean Peru. *Scientia Agropecuaria*. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.017>
- Ramírez-Gil, J. G., Cobos, M. E., Jiménez-García, D., Morales-Osorio, J. G., & Peterson, A. T. (2019). Current and potential future distributions of Hass avocados in the face of climate change across the Americas. *Crop and Pasture Science*, 70(8), 694–708. <https://doi.org/10.1071/CP19094>
- Rebolledo-Roa, A., & Burbano-Díaz, R. A. (2023). Nutrient balance in Hass avocado trees as a tool to optimize crop fertilization management. *Agronomy*, 13(8), 1956. <https://doi.org/10.3390/agronomy13081956>
- Rodríguez, P., Soto, I., Villamizar, J., & Rebolledo-Roa, A. (2023). Fatty acids and minerals as markers useful to classify Hass avocado quality: Ripening patterns, internal disorders, and sensory quality. *Horticulturae*, 9(4), 460. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040460>
- Salazar-García, S., Cossio-Vargas, L. E., Lovatt, C. J., González-Durán, I. J. L., & Pérez-Barraza, M. H. (2006). Crop load affects vegetative growth flushes and shoot age influences irreversible commitment to flowering of 'Hass' avocado. *HortScience*, 41(7), 1541–1546. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.7.1541>
- Taramuel-Taramuel, J. P., Montoya-Restrepo, I. A., Darghan Contreras, A. E., Miranda Lasprilla, D., & Barrios, D. (2025). Spatial typology of Lorena avocado production systems in Colombian lowlands (Casanare): Integrating agronomic and socioeconomic characteristics. *Sustainability*, 17(18), 8461. <https://doi.org/10.3390/su17188461>
- Tomassini-Vidal, L. R., & Pino-Huasacca, N. M. (2022). Dinámica de los macronutrientes en palto (*Persea americana* Mill.) 'Hass' bajo condiciones de la costa central peruana. *Peruvian Journal of Agronomy*, 6(1), 53–77. <https://doi.org/10.21704/pja.v6i1.1758>
- Varian, H. R. (2019). *Intermediate microeconomics* (9th ed.). W. W. Norton & Company.
- Veramendi Vega, R. (2024). *Efecto de bioestimulantes orgánicos en el rendimiento del palto Hass en Sayán* [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.
- Whiley, A. W., Schaffer, B., & Wolstenholme, B. N. (2013). *The avocado: Botany, production and uses* (2nd ed.). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781845937010.0000>
- Wilkie, J. D., Conway, J., Griffin, J., & Toegel, H. (2019). Relationships between canopy size, light interception and productivity in conventional avocado planting systems. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 94(4), 481–487. <https://doi.org/10.1080/14620316.2018.1544469>
- Wooldridge, J. M. (2020). *Introductory econometrics: A modern approach* (7th ed.). Cengage Learning.



Anexo A. Base de datos consolidada de estudios de palto Hass

Obs.	Título	Año	País	Riego	Altitud	Densi- dad	Edad	Rendimiento kg planta	Autor
1	Osmotic adjustment and yield of two varieties of avocado (Persea americana), Hass and Fuerte, with drip irrigation system, in Andean area of Peru	2024	Perú	drip	2 590	400	12	161,00	Quispe-Rodríguez et al. (2024)
2	Osmotic adjustment and yield of two varieties of avocado (Persea americana), Hass and Fuerte, with drip irrigation system, in Andean area of Peru	2024	Perú	drip	2 542	400	5	11,00	Quispe-Rodríguez et al. (2024)
3	Osmotic adjustment and yield of two varieties of avocado (Persea americana), Hass and Fuerte, with drip irrigation system, in Andean area of Peru	2024	Perú	drip	2 577	400	16	164,25	Quispe-Rodríguez et al. (2024)
4	Nutrient Balance in Hass Avocado Trees as a Tool to Optimize Crop Fertilization Management	2023	Colom bia	drip	2 500	204	12	98,04	Rebolledo-Roa & Burbano-Díaz (2023)
5	Osmotic adjustment and yield of two varieties of avocado (Persea americana), Hass and Fuerte, with drip irrigation system, in Andean area of Peru	2024	Perú	drip	2 636	400	16	197,75	Quispe-Rodríguez et al. (2024)
6	Osmotic adjustment and yield of two varieties of avocado (Persea americana), Hass and Fuerte, with drip irrigation system, in Andean area of Peru	2024	Perú	drip	2 656	400	16	151,75	Quispe-Rodríguez et al. (2024)
7	Osmotic adjustment and yield of two varieties of avocado (Persea americana), Hass and Fuerte, with drip irrigation system, in Andean area of Peru	2024	Perú	drip	2 577	400	16	136,75	Quispe-Rodríguez et al. (2024)
8	El Cultivo del Palto- BOLETÍN INIA - No 129	2005	Chile	drip	2 252	288	8	41,67	Lemus et al. (2005)
9	Sustentabilidad de la producción orgánica de palto (Persea americana Mill.) en las provincias de Huaura y Barranca, Región Lima	2023	Perú	drip	318	278	8,5	24,05	Felles-Leandro (2023)
10	Macronutrient dynamics in avocado (Persea americana Mill.) 'Hass' under the central peruvian coast conditions	2022	Perú	drip	469	278	17	71,94	Tomassini-Vidal & Pino-Huasacca (2022)
11	Sustentabilidad de la producción orgánica de palto (Persea americana Mill.) en las provincias de Huaura y Barranca, Región Lima	2023	Perú	drip	318	333	7,8	21,25	Felles-Leandro (2023)
12	Sustentabilidad de la producción orgánica de palto (Persea americana Mill.) en las provincias de Huaura y Barranca, Región Lima	2023	Perú	drip	318	400	6,4	19,98	Felles-Leandro (2023)
13	Sustentabilidad de la producción orgánica de palto (Persea americana Mill.) en las provincias de Huaura y Barranca, Región Lima	2023	Perú	drip	318	500	5,7	13,35	Felles-Leandro (2023)
14	Sustentabilidad de la producción orgánica de palto (Persea americana Mill.) en las provincias de Huaura y Barranca, Región Lima	2023	Perú	drip	318	555	5,8	13,68	Felles-Leandro (2023)
15	Mejora en el rendimiento del cultivo de palta Hass (Persea americana "Hass") mediante la instalación de un biodigestor en el Fundo Huachacmarán	2021	Perú	drip	2 000	583	5	22,32	Mendoza Huamani & Ochoa Candiotti (2021)
16	Sustentabilidad de la producción orgánica de palto (Persea americana Mill.) en las provincias de Huaura y Barranca, Región Lima	2023	Perú	drip	318	625	5	8,02	Felles-Leandro (2023)
17	Sustentabilidad de la producción orgánica de palto (Persea americana Mill.) en las provincias de Huaura y Barranca, Región Lima	2023	Perú	drip	318	1000	7,2	11,83	Felles-Leandro (2023)
18	Sustentabilidad de la producción orgánica de palto (Persea americana Mill.) en las provincias de Huaura y Barranca, Región Lima	2023	Perú	drip	318	600	5	22,63	Felles-Leandro (2023)
19	Sustentabilidad de la producción orgánica de palto (Persea americana Mill.) en las provincias de Huaura y Barranca, Región Lima	2023	Perú	mixto	318	641	5	12,67	Felles-Leandro (2023)

20	Efecto de tres bioestimulantes orgánicos en el rendimiento del palto (<i>Persea americana</i>) variedad Hass en condiciones de Sayán	2024	Perú	drip	700	833	9	23,48	Veramendi Vega (2024)
21	Factores productivos y rentabilidad de la producción de palta Hass de la asociación frutícola de palta del distrito de Limatambo	2025	Perú	drip	2 600	600	18	60,00	Huamán Berrio & López Auquis (2025)
22	Manejo productivo del cultivo de palto (<i>Persea americana</i> Mill) Var. Hass, en Chao-La Libertad	2025	Perú	drip	700	476	3	39,29	Campos Paredes (2025)
23	Manejo productivo del cultivo de palto (<i>Persea americana</i> Mill) Var. Hass, en Chao-La Libertad	2025	Perú	drip	700	476	2	10,50	Campos Paredes (2025)
24	Fatty Acids and Minerals as Markers Useful to Classify Hass Avocado Quality: Ripening Patterns, Internal Disorders, and Sensory Quality	2023	Colombia	drip	2 464	204	15	85,00	Rodríguez et al. (2023)
25	Factores físicos y técnicos que influyen en el rendimiento de palto orgánico (<i>Persea americana</i> Mill.), en Perú	2022	Perú	drip	700	1000	7,2	11,83	Felles-Leandro & García-Bendezú (2022)
26	Horticultural performance of 'Hass' avocado grafted onto seedling and clonal rootstocks under tropical wet-dry climate conditions	2022	Brazil	micro	559	208	4	7,96	Moraes et al. (2022)
27	Spatial Typology of Lorena Avocado Production Systems in Colombian Lowlands (Casanare): Integrating Agronomic and Socioeconomic Characteristics	2025	Colombia	drip	300	321	5	9,06	Taramuel-Taramuel et al. (2025)
28	Factores físicos y técnicos que influyen en el rendimiento de palto orgánico (<i>Persea americana</i> Mill.), en Perú	2022	Perú	drip	700	400	7,2	19,98	Felles-Leandro & García-Bendezú (2022)
29	Factores físicos y técnicos que influyen en el rendimiento de palto orgánico (<i>Persea americana</i> Mill.), en Perú	2022	Perú	drip	700	278	8	24,05	Felles-Leandro & García-Bendezú (2022)
30	Factores físicos y técnicos que influyen en el rendimiento de palto orgánico (<i>Persea americana</i> Mill.), en Perú	2022	Perú	drip	700	333	11	21,25	Felles-Leandro & García-Bendezú (2022)
31	Horticultural performance of 'Hass' avocado grafted onto seedling and clonal rootstocks under tropical wet-dry climate conditions	2022	Brazil	micro	559	208	5	39,83	Moraes et al. (2022)
32	Horticultural performance of 'Hass' avocado grafted onto seedling and clonal rootstocks under tropical wet-dry climate conditions	2022	Brazil	micro	559	208	6	56,45	Moraes et al. (2022)
33	Horticultural performance of 'Hass' avocado grafted onto seedling and clonal rootstocks under tropical wet-dry climate conditions	2022	Brazil	micro	559	208	7	57,88	Moraes et al. (2022)
34	Horticultural performance of 'Hass' avocado grafted onto seedling and clonal rootstocks under tropical wet-dry climate conditions	2022	Brazil	micro	559	208	8	58,22	Moraes et al. (2022)



Anexo B. Desarrollo del modelo econométrico

A. Especificación del modelo

$$Y_i = f(\text{edad}_i, \text{altitud}_i, \text{densidad}_i, \varepsilon_i)$$

donde Y_i : rendimiento por planta (kg/planta), edad_i : proxy del ciclo fisiológico del cultivo, altitud_i : proxy de condiciones climáticas (temperatura, radiación, presión), densidad_i : proxy de competencia intraespecífica, ε_i : término de error (factores no observados). Se estima un modelo log-lineal con estructura polinómica de tercer orden:

$$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1 \text{edad}_{c,i} + \beta_2 \text{edad}_{c,i}^2 + \beta_3 \text{edad}_{c,i}^3 + \beta_4 \ln(\text{alt})_{c,i} + \beta_5 \ln(\text{den})_{c,i} + \beta_6 (\text{edad}_{c,i} \cdot \ln(\text{alt})_{c,i}) + \beta_7 (\text{edad}_{c,i} \cdot \ln(\text{den})_{c,i}) + \varepsilon_i$$

donde $\text{edad}_{c,i} = \text{edad}_i - \bar{\text{edad}}$; $\ln(\text{alt})_{c,i} = \ln(\text{alt}_i) - \ln(\bar{\text{alt}})$; $\ln(\text{den})_{c,i} = \ln(\text{den}_i) - \ln(\bar{\text{den}})$

B. Representación matricial

El modelo se expresa como: $y = X\beta + \varepsilon$

donde $y = (\ln y_1, \dots, \ln y_n)'$; $\beta = (\beta_0, \dots, \beta_7)'$; X es la matriz de regresores:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & \text{edad}_{c,1} & \text{edad}_{c,1}^2 & \text{edad}_{c,1}^3 & \ln(\text{alt})_{c,1} & \ln(\text{den})_{c,1} & \text{edad}_{c,1} \ln(\text{alt})_{c,1} & \text{edad}_{c,1} \ln(\text{den})_{c,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \text{edad}_{c,n} & \text{edad}_{c,n}^2 & \text{edad}_{c,n}^3 & \ln(\text{alt})_{c,n} & \ln(\text{den})_{c,n} & \text{edad}_{c,n} \ln(\text{alt})_{c,n} & \text{edad}_{c,n} \ln(\text{den})_{c,n} \end{bmatrix}$$

C. Estimación por Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS)

El estimador OLS se obtiene minimizando: $\min_{\beta} (y - X\beta)'(y - X\beta)$, cuya solución cerrada es $\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y$

D. Inferencia estadística

1. Valores ajustados: $\hat{y} = X\hat{\beta}$. 2. Residuos: $\hat{\varepsilon}_i = y_i - \hat{y}_i$. 3. Varianza del error: $\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum \hat{\varepsilon}_i^2}{n-k}$. 4. Varianza de los coeficientes:

$$\text{Var}(\hat{\beta}) = \hat{\sigma}^2 (X'X)^{-1}. \quad 5. \text{Prueba t: } t_j = \frac{\hat{\beta}_j}{SE(\hat{\beta}_j)}. \quad 6. \text{Intervalos de confianza: } \hat{\beta}_j \pm t_{\alpha/2} \cdot SE(\hat{\beta}_j)$$

E. Transformación a escala real

Como el modelo se estima: $y = \exp(\ln y)$, la predicción insesgada en nivel se obtiene como: $\hat{y} = \exp(\ln \hat{y} + \frac{1}{2} \hat{\sigma}^2)$

F. Dinámica productiva

1. Tasa de crecimiento (derivada logarítmica): $\frac{d \ln(y)}{d \text{edad}} = \beta_1 + 2\beta_2 \text{edad}_c + 3\beta_3 \text{edad}_c^2 + \beta_6 \ln(\text{alt})_c + \beta_7 \ln(\text{den})_c$
2. Producto marginal: $PMg = \frac{dy}{d \text{edad}} = y \cdot \frac{d \ln(y)}{d \text{edad}}$
3. Curvatura (segunda derivada): $\frac{d^2 \ln(y)}{d \text{edad}^2} = 2\beta_2 + 6\beta_3 \text{edad}_c$

G. Puntos característicos de la función

1. Máximo productivo: $\text{edad}_{max} = \arg \max_{\text{edad}} y(\text{edad})$
2. Punto de inflexión: $\frac{d^2 y}{d \text{edad}^2} = 0 \Rightarrow \frac{d^2 \ln(y)}{d \text{edad}^2} + \left(\frac{d \ln(y)}{d \text{edad}} \right)^2 = 0$
3. Interpolación numérica: $x^* = x_0 - \frac{f(x_0)(x_1 - x_0)}{f(x_1) - f(x_0)}$

H. Óptimo técnico

1. Producto medio: $PMe = \frac{y}{\text{edad}}$
 2. Condición de optimalidad: $PMg = PMe \Rightarrow \frac{dy}{d \text{edad}} = \frac{y}{\text{edad}} \Rightarrow$ Sustituyendo: $y \cdot \frac{d \ln(y)}{d \text{edad}} = \frac{y}{\text{edad}} \Rightarrow \frac{d \ln(y)}{d \text{edad}} = \frac{1}{\text{edad}}$
- Interpretación: El óptimo técnico ocurre cuando la tasa de crecimiento relativa del rendimiento es igual al inverso de la edad.

I. Diagnósticos econométricos

Durbin-Watson: autocorrelación; Breusch-Pagan: heterocedasticidad; Jarque-Bera: normalidad

J. Multicolinealidad: $VIF_j = \frac{1}{1-R_j^2}$

K. Validación del modelo

Error cuadrático medio: $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2}$ y Evaluación de generalización: $\text{Ratio} = \frac{RMSE_{test}}{RMSE_{train}}$