


Ramon Celso Solís Hospital
Catalina Silvia Rodríguez Rosales
Josué Hernán Inga Ortiz
Walver Keiser Lázaro Rodríguez
Aurelia Bertila Huaman Cristobal
Iris Sánchez Baldeón
Flor Yenny Tucto Ortega

MONITOREO DE LA PRODUCCIÓN DEL CULTIVO DE MACA (*Lepidium meyenii*) en la región de Pasco Perú periodo 2002-2024




científica digital



CIENTÍFICA DIGITAL EDITORIAL LTDA

Barueri - São Paulo - Brasil
www.cientificadigital.org - contato@cientificadigital.org

Diagramação e Arte Edição © 2025 Científica Digital
Equipe Editorial Texto © 2025 Os Autores
Imagens da Capa 1ª Edição - 2025
Adobe Stock - 2025 Acesso Livre - Open Access

© COPYRIGHT DIREITOS RESERVADOS. A editora detém os direitos autorais pela edição e projeto gráfico. Os autores detêm os direitos autorais dos seus respectivos textos. Esta obra foi licenciada com uma Licença de Atribuição Creative Commons – Atribuição 4.0 Internacional, permitindo o download e compartilhamento integral ou em partes, desde que seja citada a fonte, com os créditos atribuídos aos autores e obrigatoriamente no formato Acesso Livre (Open Access) e sem a possibilidade de alteração de nenhuma forma. É proibida a catalogação em plataformas com acesso restrito e/ou com fins comerciais.



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M744 Monitoreo de la producción del cultivo de maca (*Lepidium meyenii*) en la región de Pasco Perú periodo 2002-2024 / Ramon Celso Solís Hospinal, Catalina Silvia Rodríguez Rosales, Josué Hernán Inga Ortiz, et al. – BARUERI-SP: Científica Digital, 2025.

Outros autores: Walver Keiser Lázaro Rodríguez, Aurelia Bertila Huaman Cristobal, Iris Sánchez Baldeón, Flor Yenny Tucto Ortega.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acceso: World Wide Web

Inclui Bibliografía

ISBN 978-65-6155-053-6

DOI 10.37885/978-65-6155-053-6

1. Agricultura. I. Hospinal, Ramon Celso Solís. II. Rosales, Catalina Silvia Rodríguez. III. Ortiz, Josué Hernán Inga. IV. Título.

CDD 630

Elaborado por Janaína Ramos – CRB-8/9166

Índice para catálogo sistemático:

I. Agricultura

E-BOOK

ACESSO LIVRE ON LINE - IMPRESSÃO PROIBIDA

2025

Ramon Celso Solís Hospinal
Catalina Silvia Rodríguez Rosales
Josué Hernán Inga Ortiz
Walver Keiser Lázaro Rodríguez
Aurelia Bertila Huaman Cristobal
Iris Sánchez Baldeón
Flor Yenny Tucto Ortega

**Monitoreo de la Producción del Cultivo de
Maca (*Lepidium meyenii*) en la Región de
Pasco Perú, Periodo 2002-2024**

1ª EDIÇÃO



científica digital

2025 - BARUERI - SP

CONSELHO EDITORIAL

Prof. Dr. André Cutrim Carvalho
Prof. Dr. Antônio Marcos Mota Miranda
Prof^a. Ma. Auristela Correa Castro
Prof. Dr. Carlos Alberto Martins Cordeiro
Prof. Dr. Carlos Alexandre Oelke
Prof^a. Dra. Caroline Nóbrega de Almeida
Prof^a. Dra. Clara Mockdece Neves
Prof^a. Dra. Claudia Maria Rinhel-Silva
Prof^a. Dra. Clecia Simone Gonçalves Rosa Pacheco
Prof. Dr. Cristiano Marins
Prof^a. Dra. Cristina Berger Fadel
Prof. Dr. Daniel Luciano Gevehr
Prof. Dr. Diogo da Silva Cardoso
Prof. Dr. Ernane Rosa Martins
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes
Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves
Prof^a. Dra. Fernanda Rezende
Prof. Dr. Flávio Aparecido de Almeida
Prof^a. Dra. Francine Náthalie Ferraresi Queluz
Prof^a. Dra. Geuciane Felipe Guerim Fernandes

Prof. Dr. Humberto Costa
Prof. Dr. Joachin Melo Azevedo Neto
Prof. Dr. Jónata Ferreira de Moura
Prof. Dr. José Aderval Aragão
Prof. Me. Julianno Pizzano Ayoub
Prof. Dr. Leonardo Augusto Couto Finelli
Prof. Dr. Luiz Gonzaga Lapa Junior
Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva
Prof^a. Dra. Maria Cristina Zago
Prof^a. Dra. Maria Otília Zangão
Prof. Dr. Mário Henrique Gomes
Prof. Dr. Nelson J. Almeida
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes
Prof. Dr. Pedro Afonso Cortez
Prof. Dr. Reinaldo Pacheco dos Santos
Prof. Dr. Rogério de Melo Grillo
Prof^a. Dra. Rosenery Pimentel Nascimento
Prof. Dr. Rossano Sartori Dal Molin
Prof. Me. Silvio Almeida Junior
Prof^a. Dra. Thays Zigante Furlan Ribeiro
Prof. Dr. Wesceley Viana Evangelista
Prof. Dr. Willian Carboni Viana
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

Acesse a lista completa dos Membros do Conselho Editorial em www.editoracientifica.com.br/conselho

Parecer e revisão por pares

Os textos que compõem esta obra foram submetidos para avaliação do Conselho Editorial e Revisados por Pares Externos (Peer Review), sendo indicados para publicação.

Nota: Esta é uma produção independente, tornando-se uma obra com reservas de direitos autorais para os autores. Alguns textos podem ser derivados de outros trabalhos já apresentados ou defendidos, todavia, os autores foram instruídos ao cuidado com o autoplágio. A responsabilidade pelo conteúdo é exclusiva dos autores, não representando, necessariamente, a opinião da editora, tampouco dos organizadores, revisores e membros do Conselho Editorial.

AUTORES



Ramon Celso Solís Hospinal

Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible
Magister Scientiae en Sistemas de Producción Agropecuaria
Ingeniero Zootecnista y Licenciado Educación Especialidad Biología y Química
<https://orcid.org/0000-0003-0237-579X>
rsolish@undac.edu.pe
Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Perú
CTI Vitae P001527 <https://bit.ly/3Jmu9sP>



Catalina Silvia Rodríguez Rosales

Doctora en Ciencias Biológicas
Magister en Biotecnología y Bioingeniería
Bióloga
<https://orcid.org/0000-0003-4933-4637>
crodriguezr@undac.edu.pe
Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Perú
CTI Vitae P00 87272 <http://bit.ly/4fKrANc>



Josué Hernán Inga Ortiz

Magister Scientiae en Producción Agrícola
Ingeniero Agrónomo
<https://orcid.org/0000-0003-0147-0197>
jjngaortiz@undac.edu.pe
Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Perú
CTI Vitae P0016589 <https://bit.ly/3HiLpP7>



Walver Keiser Lázaro Rodríguez

Magister Scientiae en Producción Agrícola
Ingeniero Agrónomo
<https://orcid.org/0000-0002-2626-5010>
wlazaro@uns.edu.pe
Universidad Nacional del Santa, Perú
CTI Vitae P00 94153 <https://bit.ly/4lvABet>



Aurelia Bertila Huaman Cristobal

Maestra en educación con mención en Educación Superior
Ingeniero Agrónomo
<https://orcid.org/0000-0001-6738-6444>
ahuaman@undac.edu.pe
Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Perú
CTI Vitae P00 151243 <https://bit.ly/46Z1rbf>



Iris Sánchez Baldeón

Magister en Biodiversidad, Paisajes y Gestión Sostenible

Ingeniero Agrónomo

<https://orcid.org/0009-0008-4010-1128>

isanchez@undac.edu.pe

Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Perú

CTI Vitae P00 148079 <https://bit.ly/4IB6JgO>



Flor Yenny Tucto Ortega

Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

Ingeniero Agrónomo

<https://orcid.org/0009-0007-0714-0996>

ftuctoo@undac.edu.pe

Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Perú

CTI Vitae P00 94689 <https://bit.ly/41ff9D3>

RESUMEN

La presente investigación analiza la relación entre las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa y precipitación) y el rendimiento del cultivo de maca (*Lepidium meyenii*) en la región Pasco durante el periodo 2002–2024. Se emplearon datos oficiales del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) y del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), procesados mediante análisis de correlación, regresión lineal simple y múltiple, así como proyecciones de tendencia. Los resultados muestran que no existe una tendencia estadísticamente significativa en el rendimiento ni en el área cultivada de maca durante el periodo analizado. Las variables meteorológicas explicaron solo el 17,8 % de la variación en el rendimiento, lo que revela la influencia determinante de factores de manejo agronómico, prácticas de conservación de suelos y dinámicas de mercado. La proyección al 2030 estima un rendimiento de 5,03 t/ha y un área cultivada de 164 ha, reflejando un escenario de estabilidad moderada. Se concluye que, para fortalecer la capacidad predictiva y la resiliencia climática del cultivo, es necesario incorporar variables edáficas, de manejo y socioeconómicas en futuros estudios. Este trabajo aporta una base técnica útil para orientar políticas agrarias en la región Pasco y promover la sostenibilidad de la maca frente al cambio climático.

Palabras-clave: Maca; Clima; Rendimiento Agrícola; Sostenibilidad.

RESUMO

Este estudo analisa a relação entre variáveis meteorológicas (temperatura, umidade relativa e precipitação) e o rendimento da cultura da maca (*Lepidium meyenii*) na região de Pasco de 2002 a 2024. Foram utilizados dados oficiais do Ministério do Desenvolvimento Agrário e Irrigação (MIDAGRI) e do Serviço Nacional de Meteorologia e Hidrologia (SENAMHI), processados por meio de análise de correlação, regressão linear simples e múltipla e projeções de tendência. Os resultados não mostram tendência estatisticamente significativa no rendimento da maca ou na área cultivada durante o período analisado. As variáveis meteorológicas explicaram apenas 17,8% da variação do rendimento, revelando a influência determinante de fatores de manejo agrônômico, práticas de conservação do solo e dinâmica de mercado. A projeção para 2030 estima um rendimento de 5,03 t/ha e uma área cultivada de 164 ha, refletindo um cenário de estabilidade moderada. Conclui-se que, para fortalecer a capacidade preditiva e a resiliência climática da cultura, é necessário incorporar variáveis de solo, manejo e socioeconômicas em estudos futuros. Este trabalho fornece uma base técnica útil para orientar políticas agrícolas na região de Pasco e promover a sustentabilidade da maca diante das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Maca; Clima; Produtividade Agrícola; Sustentabilidade.

ÍNDICE

RESUMEN	7
RESUMO	8

CAPÍTULO I

1 EL PROBLEMA	11
1.1 Determinación del problema	11
1.2 Formulación del problema	14
1.3 Objetivo de investigación	14
1.4 Justificación.....	14

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO	16
2.1 Antecedentes.....	16
2.2 Bases teóricas.....	18
2.3 Bases conceptuales.....	20
2.4 Definición de términos.....	38

CAPÍTULO III

3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	41
3.1 Tipo y diseño de investigación	41
3.2 Variables.....	41
3.3 Población, muestra, muestreo, unidad de análisis	42
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	45
3.5 Procedimientos.....	45
3.6 Métodos de análisis de datos	45
3.7 Aspectos éticos.....	45

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS.....	47
4.1 Análisis estadístico.....	47

CAPÍTULO V

5 DISCUSIÓN.....	60
6 CONCLUSIONES.....	63
7 RECOMENDACIONES.....	64
REFERENCIAS.....	65

1 EL PROBLEMA

1.1 Determinación del problema

La maca (*Lepidium meyenii*) es un cultivo emblemático de los Andes centrales del Perú, apreciado por su valor nutricional, medicinal y adaptabilidad a zonas de alta altitud, generalmente superiores a los 4000 m.s.n.m. En la región Pasco, especialmente en provincias como Daniel Alcides Carrión y Pasco, se cultiva esta raíz desde tiempos ancestrales. Sin embargo, pese a su importancia cultural y económica, la producción de maca ha mostrado fluctuaciones notorias en su rendimiento anual durante el periodo 2004–2024, sin una explicación técnica consensuada sobre sus causas. A esto se suma la presión del cambio climático y la variabilidad climática, que introducen incertidumbre en el manejo agronómico de la maca. El desconocimiento técnico sobre cómo influyen factores meteorológicos como la temperatura, la humedad relativa y la precipitación en el rendimiento del cultivo limita la toma de decisiones adecuadas en políticas de desarrollo rural, planificación de campañas agrícolas, selección de sitios óptimos de siembra y adopción de tecnologías agrícolas resilientes al clima. En este contexto, surge la necesidad urgente de analizar rigurosamente las variables climáticas y su relación con la productividad de la maca para responder a una problemática agrícola, socioeconómica y ambiental concreta en una región que depende en gran medida de cultivos altoandinos como este.

Durante las dos últimas décadas, los informes técnicos del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), los gobiernos regionales y las organizaciones campesinas han reportado rendimientos dispares de maca en diversas campañas agrícolas. Estas variaciones no siempre han estado relacionadas con las prácticas de manejo, sino que en muchos casos coinciden con años atípicos en cuanto a comportamiento climático. Se han registrado, por ejemplo, campañas con heladas tempranas, lluvias fuera de estación o periodos prolongados de sequía que han coincidido con caídas importantes en la producción de

maca. A pesar de ello, no existen suficientes estudios sistemáticos que integren datos meteorológicos históricos con información agronómica local, ni modelos predictivos que orienten a los agricultores sobre los riesgos productivos según las condiciones climáticas. Esto genera una brecha de conocimiento que impide formular estrategias de adaptación climática enfocadas en este cultivo. La falta de análisis científico impide también identificar umbrales críticos de temperatura, humedad o precipitación que podrían estar afectando fisiológicamente el desarrollo de la planta, desde su emergencia hasta la formación del hipocótilo, lo que a su vez compromete la seguridad alimentaria y los ingresos de las familias altoandinas que dependen de este cultivo.

El problema se agrava considerando que la maca es un cultivo sensible a los microclimas y al momento de la siembra, pero cuya producción no ha sido adecuadamente monitoreada con herramientas estadísticas que permitan prever su rendimiento. En ausencia de esta información, los agricultores de Pasco enfrentan una alta incertidumbre cada campaña, lo que limita su capacidad de planificar la producción, acceder a créditos agrarios, o participar en mercados formales y cadenas de exportación. Al no contar con modelos de regresión ni análisis de correlación que relacionen el rendimiento de la maca con variables meteorológicas clave, se reduce la capacidad técnica de las instituciones públicas y privadas para brindar asistencia agrícola contextualizada. Por ello, es fundamental evaluar cuantitativamente las relaciones existentes entre las condiciones climáticas y la producción de maca durante el periodo 2004–2024, utilizando análisis de regresión lineal, múltiple y correlación. Esto permitirá identificar patrones de comportamiento, prever escenarios de riesgo, optimizar calendarios agrícolas y, en última instancia, mejorar la resiliencia de los sistemas productivos de maca ante el cambio climático. El problema no es únicamente técnico, sino estructural, ya que afecta la sostenibilidad de una cadena productiva que podría tener un rol protagónico en el desarrollo económico y ecológico de los Andes centrales.

1.2 Formulación del problema

¿Cuál es la relación entre las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa y precipitación) y el rendimiento del cultivo de maca (*Lepidium meyenii*) en la región de Pasco durante el periodo 2004–2024?

1.3 Objetivo de investigación

Analizar la relación entre las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa y precipitación) y el rendimiento del cultivo de maca (*Lepidium meyenii*) en la región de Pasco durante el periodo 2004–2024.

1.4 Justificación

La maca (*Lepidium meyenii*) es uno de los cultivos más representativos de los Andes peruanos, especialmente en altitudes superiores a los 4,000 m.s.n.m., donde pocas especies agrícolas logran desarrollarse. En la región Pasco, su cultivo no solo tiene importancia histórica y cultural, sino también creciente valor económico, dado el interés nacional e internacional en sus propiedades nutricionales, energizantes y medicinales. No obstante, a pesar de su relevancia, la productividad de la maca ha presentado fluctuaciones considerables en las últimas dos décadas, situación que pone en riesgo la sostenibilidad de su cultivo. Esta investigación busca llenar un vacío técnico y científico al analizar cómo factores meteorológicos —como la temperatura, la humedad relativa y la precipitación— han influido en los rendimientos anuales de maca entre 2004 y 2024. Generar este conocimiento permitirá comprender mejor los comportamientos agronómicos del cultivo y anticipar impactos del clima en su productividad.

Desde el punto de vista técnico, esta investigación es fundamental porque aportará información precisa y validada estadísticamente sobre los efectos del clima en el rendimiento de la maca, mediante el uso de análisis de correlación y modelos de regresión lineal y múltiple. Esto no solo permitirá identificar los factores climáticos más determinantes, sino también construir modelos predictivos que orienten a los agricultores, técnicos y autoridades en la toma de decisiones agronómicas. En un contexto de cambio climático global,

donde la variabilidad de las temperaturas y las lluvias afecta cada vez más a los cultivos altoandinos, disponer de estas herramientas analíticas es clave para diseñar estrategias de adaptación, mejorar la planificación de campañas agrícolas y fortalecer la resiliencia de los sistemas productivos. Asimismo, esta investigación contribuirá a optimizar el manejo del cultivo de maca en función de escenarios climáticos reales y medibles, permitiendo una mejor gestión del riesgo agroclimático.

Finalmente, la investigación tiene una justificación social y estratégica, ya que beneficiará directamente a las comunidades rurales altoandinas de Pasco, quienes dependen de la maca como fuente principal de ingresos y alimentación. La generación de evidencia científica sobre la influencia del clima en el rendimiento de este cultivo puede ser utilizada por instituciones públicas y privadas, universidades, ONGs y programas de desarrollo rural para diseñar políticas agrarias basadas en datos reales y tendencias históricas. Además, los resultados del estudio podrán ser aplicados en programas de capacitación, extensión agrícola y transferencia tecnológica, promoviendo una agricultura más informada, resiliente y sostenible en zonas altoandinas. De esta manera, el presente estudio no solo tiene valor académico, sino también impacto práctico, económico y social en el desarrollo territorial de la región Pasco Perú.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

El INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática (2024) publica una serie continua para Pasco que desagrega la producción agropecuaria por subsectores y principales productos (2001–2024). Esta base permite reconstruir líneas de tiempo y choques anuales en la actividad agraria regional, insumo clave para vincular área/volumen de maca con variabilidad climática y de mercado durante todo el periodo de estudio, sin embargo, los datos no son completos y toman como base datos del Ministerio de desarrollo agrario y riego.

El Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego y el Sistema Integrado de Estadística Agraria (MIDAGRI–SIEA, 2024) afirman que los reportes mensuales del SIEA muestran tendencias recientes por región y contribuyen a monitorear el pulso agropecuario de Pasco (índices, participación y variación interanual). Aunque son agregados por subsectores, sirven para triangular los picos y caídas que también afectan al cultivo de maca, especialmente en años con anomalías térmicas.

El Instituto Nacional de Defensa del Consumidor (INDECOPI, 2024/2011) reportan en un documento técnico de la DO (2011) delimita el terruño histórico de producción entre Junín y Pasco (3 950–4 500 m s. n. m.), establece condiciones ambientales y prácticas tradicionales, y reconoce la vinculación geográfica del producto maca; es un hito institucional que respalda la trazabilidad y el monitoreo diferenciado para Pasco.

Perúbiodiverso (2025) refieren que el estudio de cadena de valor documenta que hacia 2006 la meseta Junín–Pasco concentraba ~73 % de la producción nacional, presenta costos/ha 2006–2007 y caracteriza actores (productores, acopiadores, transformadores), brindando una línea de base

histórica para el periodo inicial 2002–2007 del monitoreo, por lo que sería una primera aproximación al estudio de evaluación de la producción de maca.

Exportemos.pe, (2025) reportan que el “POP Maca – Pasco” compila series de exportación (maca fresca y harina) desde 2002, mostrando la temprana dinámica comercial del cultivo y su diversificación en presentaciones; es útil para relacionar incentivos de mercado con expansión de áreas en Pasco al inicio del periodo.

La revista Agraria.pe, (2016) menciona que la certificación orgánica para productores de maca de ambas regiones (≈480 ha) fortaleció acceso a mercados (UE/USDA), requisitos de trazabilidad y prácticas de manejo, factores que suelen correlacionar con mejoras en calidad y seguimiento productivo; constituye un antecedente institucional relevante para la segunda mitad del periodo y recomienda realizar monitoreo constante en la producción.

El Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI, (2024) en el informe técnico del INEI para julio de 2024 reporta variación positiva de la producción regional de Pasco (+32,99 %) frente a condiciones térmicas adversas en otras regiones, evidenciando resiliencia y heterogeneidad espacial; estos cambios macro ayudan a enmarcar la evolución reciente del cultivo en Pasco, por lo que es importante la evaluación y monitoreo constante.

El Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego MIDAGRI (2016) reportó un récord de 58 mil t de maca (2015) a nivel nacional (↑173 % vs. 2014), asociado a un boom de siembras y precios; este hito reconfiguró áreas y flujos de comercialización en las principales zonas productoras, entre ellas Pasco, aportando contexto para interpretar el subperiodo 2014–2016.

Custodio *et al.*, (2021) realizaron un estudio en los Andes centrales (Meseta del Bombón) comparó suelos control vs. bajo presión de cultivo de maca, revelando descensos en MO, N, P, K y Ca y cambios en comunidades bacterianas; esta evidencia respalda la necesidad de monitorear sostenibilidad y su posible vínculo con rendimientos en Pasco.

El manual de cultivo de maca de la UNALM describe prácticas predominantes en Pasco y Junín (bajo uso de abonos, selección de terrenos eriazos, rotaciones irregulares), ofreciendo parámetros técnicos para interpretar variaciones de rendimiento y efectos de manejo a lo largo de 2002–2024 (Universidad Nacional Agraria La Molina, 2025).

2.2 Bases teóricas

a. Teoría del monitoreo de cultivos

El monitoreo de cultivos es un proceso sistemático que permite observar, medir y analizar el desarrollo de las plantas a lo largo de su ciclo de crecimiento, con el objetivo de identificar factores que afectan su rendimiento y calidad. Este enfoque se basa en la recopilación de datos en campo, el uso de indicadores agronómicos y la integración de herramientas tecnológicas para comprender la dinámica de los cultivos en interacción con el ambiente (Gómez *et al.*, 2019).

Desde una perspectiva agronómica, la teoría del monitoreo de cultivos sostiene que el seguimiento continuo permite detectar oportunamente problemas relacionados con plagas, enfermedades, deficiencias nutricionales o estrés hídrico. Estos datos permiten aplicar medidas correctivas y mejorar la toma de decisiones, reduciendo riesgos y optimizando recursos en la producción agrícola (Lobell *et al.*, 2020).

El monitoreo también se fundamenta en modelos de crecimiento y en el análisis de variables ambientales como temperatura, precipitación y radiación solar, que influyen directamente en el desarrollo fenológico de los cultivos. La teoría plantea que el seguimiento sistemático de estas variables contribuye a prever escenarios productivos y a diseñar estrategias de manejo adaptadas a las condiciones locales (Hatfield & Walthall, 2015).

Además, con el avance tecnológico, la teoría del monitoreo de cultivos se ha ampliado hacia el uso de sensores remotos, imágenes satelitales y sistemas de información geográfica (SIG), que permiten una evaluación más precisa y a gran escala. Este enfoque multiescalar combina observaciones de campo con herramientas digitales, generando predicciones de rendimiento y evaluaciones de la sostenibilidad agrícola (Mulla, 2013).

b. Teoría de la evaluación de cultivos en un periodo de tiempo

La evaluación de cultivos en un periodo de tiempo constituye una herramienta esencial para comprender la dinámica productiva de los sistemas

agrícolas. Se basa en la recopilación sistemática de datos relacionados con el crecimiento, desarrollo fenológico, estado nutricional y rendimiento final de las plantas. Este enfoque permite identificar patrones temporales en la respuesta del cultivo frente a factores ambientales como la temperatura, precipitación, radiación solar y calidad del suelo. A lo largo del ciclo productivo, la evaluación periódica facilita la detección de problemas como deficiencias minerales, estrés hídrico, plagas o enfermedades, posibilitando la implementación de medidas correctivas oportunas. Además, integra métodos de campo tradicionales, como muestreos y mediciones directas, con tecnologías avanzadas como sensores remotos, imágenes satelitales y modelos de simulación de crecimiento. La teoría plantea que el análisis temporal no solo aporta datos para mejorar el rendimiento inmediato, sino que también genera información valiosa para predecir escenarios futuros y establecer estrategias de manejo más eficientes. De esta manera, se fortalece la sostenibilidad agrícola al optimizar el uso de recursos y mejorar la resiliencia frente a condiciones adversas. Asimismo, la evaluación de cultivos en el tiempo ofrece una base científica para la planificación de políticas agrícolas, la investigación aplicada y la transferencia tecnológica hacia los productores. En síntesis, se trata de un proceso dinámico y continuo que conecta observaciones empíricas con herramientas científicas, orientado a garantizar productividad y sostenibilidad en la agricultura moderna (Lobell *et al.*, 2020).

c. Teoría del crecimiento poblacional y necesidad de alimentos

La teoría del crecimiento poblacional y la necesidad de alimentos se centra en la relación directa entre el aumento de la población y la presión sobre los recursos alimentarios. A medida que la población mundial crece, se incrementa la demanda de productos agrícolas, lo que exige una mayor capacidad de producción y distribución de alimentos. El planteamiento central establece que, si la producción agrícola no crece al mismo ritmo que la población, se generan desequilibrios que pueden traducirse en inseguridad alimentaria, pobreza y malnutrición. Esta teoría también considera que el crecimiento poblacional es generalmente exponencial,

mientras que la producción de alimentos crece de manera más lenta, lo que genera una brecha difícil de cerrar. Por ello, se subraya la importancia de innovaciones tecnológicas, como la biotecnología, el mejoramiento genético de cultivos y la gestión eficiente de recursos hídricos y suelos, para elevar la productividad agrícola. Además, se destaca que las políticas de desarrollo agrícola y los programas de seguridad alimentaria son esenciales para atender las necesidades de una población en constante expansión. De manera complementaria, la teoría resalta la necesidad de abordar aspectos ambientales, ya que el crecimiento poblacional incrementa la presión sobre ecosistemas y recursos naturales. Finalmente, este enfoque sostiene que la sostenibilidad y la seguridad alimentaria solo podrán alcanzarse si se logra un equilibrio entre población, producción agrícola y conservación ambiental (Malthus, 1998).

2.3 Bases conceptuales

2.3.1 Generalidades

La maca es una crucífera originaria de las mesetas altoandinas del centro del Perú (Meseta de Bombón – cercanías del lago Junín y áreas de la puna), donde tradicionalmente se cultiva entre aproximadamente 3700 y 4500 msnm. Se adapta a suelos pobres, temperaturas frías y radiación alta; por ello es considerada una especie típica de los pisos ecológicos suni–puna. Estas características ecológicas fueron documentadas por investigadores y textos de geografía regional del Perú (Pulgar Vidal, 1972) y por revisiones etnobotánicas y agronómicas, la maca tolera heladas, su época de crecimiento está condicionada por la estación seca y requiere prácticas de manejo que reduzcan pérdidas por heladas y plagas de raíz (manejo de suelos, rotaciones y selección de parcelas bien drenadas) (Gonzales, 2011 y Bianchi, 2003).

Numerosos estudios y revisiones han reportado que la maca contiene carbohidratos, fibra, proteínas, aminoácidos, ácidos grasos, vitaminas (C) y minerales (Fe, Cu, etc.), además de compuestos bioactivos propios (glucosinolatos, macamidias, macaenos). Se la ha vinculado tradicionalmente y en estudios científicos con efectos sobre vitalidad, energía, rendimiento físico y

función sexual (afrodisíaco); sin embargo, los mecanismos y la evidencia clínica varían entre estudios y colores/variedades de maca (Minich, 2024).

Advertencia científica: aunque hay evidencia de beneficios (ensayos y revisiones), hacen falta más estudios clínicos bien diseñados para establecer dosis, seguridad a largo plazo y mecanismos moleculares (Del Carpio, 2024).

Las raíces/tubérculos andinos (mashua, oca, olluco) comparten adaptaciones a suelos marginales y altitudes elevadas; sin embargo, difieren en composición de almidón, proteínas y usos culturales/culinarios. Por ejemplo: Oca y olluco son más tuberosos con alto contenido de almidón – útiles como fuente calórica tradicional. La maca destaca por su perfil proteico y compuestos bioactivos (glucosinolatos, macamidas) y por su uso tradicional como alimento/medicamento. Comparativas recientes sobre almidones y propiedades fisicoquímicas muestran diferencias que afectan la transformación industrial y el valor agregado (Velasquez-Barreto, 2021).

En la literatura y en comunicados sobre nutrición espacial se discute la búsqueda de alimentos funcionales, nutritivos y compactos para misiones largas; no existe una documentación abierta y primaria de que la NASA haya incorporado rutinariamente maca como insumo oficial. Hay, eso sí, discusiones y reseñas sobre alimentos andinos con potencial para planes de nutrición espacial por su densidad nutritiva y estabilidad (pero se requiere más evidencia y validación). Por tanto: se ha sugerido y explorado en discusiones científicas/comerciales, pero no hay evidencia pública contundente de uso institucional regular en misiones (NASA, 2021).

Hay evidencia (estudios históricos y etnográficos) de cultivo de maca en zonas del departamento de Pasco (y Junín, Puno), en altitudes de puna; investigaciones locales y revisiones etnográficas describen su presencia en la sierra central. La expansión y contracción de área sembrada ha variado con el mercado y la migración campesina (Bianchi, 2003).

El crecimiento de las exportaciones desde el auge comercial (1990–2010) la maca pasó de ser un cultivo local a un producto de exportación (harina, polvo, cápsulas). Hubo picos de exportación y precios altos (por ejemplo, años con incremento fuerte de exportaciones y valores récord como 2015). En años recientes las exportaciones y precios han mostrado volatilidad. La producción orgánica muestra que existe un segmento de maca orgánica con demanda

internacional; certificaciones orgánicas aumentan el valor, pero requieren inversiones y trazabilidad. El desarrollo de cadenas de valor orgánico ha sido promovido por proyectos públicos y privados. Los precios de exportación y contraoferta han subido en años de auge (picos documentados en la década de 2010) y se han corregido en años posteriores; además hay competencia (producción en China y otros actores) que influye en precios internacionales. Las cifras de precios de polvo/harina muestran rangos amplios y volatilidad reciente (Tridge, 2024 y OrganicCrops, 2016).

La industrialización (procesamiento a polvo, gelatinizado, extractos, cápsulas, alimentos funcionales) ha creado valor agregado; sin embargo, se requieren inversiones en infraestructura, almacenamiento y control de calidad para competir en mercados internacionales. Instituciones como FAO, World Bank y agencias nacionales han recomendado fortalecer cadenas de valor, asistencia técnica y acceso a mercados para los productores altoandinos (World Bank, 2017).

Riesgos: bioacumulación de metales pesados en suelos andinos y trazabilidad alimentaria son preocupaciones recientes (Tejada-Purizaca, 2024).

Entre los vacíos de investigación se debe realizar ensayos clínicos robustos sobre efectos en salud, estandarización de compuestos bioactivos por variedad y altitud, impacto ambiental del aumento de cultivo, y validación de protocolos productivos sostenibles, promover investigación agronómica local (variedades y manejo por altitud), certificación orgánica cuando sea viable, infraestructura de procesamiento local para valor agregado y políticas públicas que apoyen precios justos y acceso a mercados.

a. Historia de la maca

La maca es una raíz-andígena de la familia Brassicaceae que se ha cultivado en la meseta del Bombón, en el centro de los Andes (cercañas del lago Chinchaycocha — Junín, Perú) desde hace más de mil años; estudios etnobotánicos y arqueológicos sitúan su domesticación entre aproximadamente 1 300 y 2 000 años atrás. Tradicionalmente las poblaciones altoandinas la consumían seca o cocida como alimento energético y la utilizaban también por sus propiedades para la fertilidad

y la resistencia al frío, aprovechando su adaptación a 4 000–4 500 m s. n. m., descripciones históricas desde la época colonial confirman su uso como alimento y para intercambios locales. Durante la época colonial y la República temprana la maca apareció en crónicas (por ejemplo, Cieza de León, Cobo) y documentos donde se describe su uso alimentario y como tributo/intercambio; su capacidad de conservación (hipocótilos secos duros) facilitó su almacenamiento y traslado. A lo largo de los siglos la raíz permaneció como cultivo local de altura, apreciada por los pobladores andinos, pero con presencia limitada fuera de su zona de origen hasta épocas recientes (salvo episodios puntuales de comercio). Esta continuidad de uso tradicional y las descripciones tempranas están registradas y analizadas en revisiones etnobotánicas modernas (Gonzales, 2011).

Hasta finales del siglo XX la producción de maca era relativamente limitada (pequeñas extensiones en Junín) y la planta estuvo casi “olvidada” fuera de la región; sin embargo, a partir de finales de los años 1980 y sobre todo en los 90 se inició una expansión marcada por políticas públicas, demanda externa y comercialización a mercados de “superalimentos”. En la primera década del siglo XXI las exportaciones peruanas crecieron notablemente; además, el interés internacional aceleró la expansión del área cultivada y la aparición de cadenas de valor (con consecuencias económicas y sociales para comunidades altoandinas). Esta fase de “boom” y de cambio en las cadenas de comercialización está descrita por estudios periodísticos y análisis económicos que documentaron aumentos fuertes de precios y exportaciones en la década 2000–2015 (Collyns, 2015).

La investigación científica moderna (farmacología, fitoquímica y nutrición) se intensificó desde los años 2000: se describieron tipos de maca por color (amarilla, roja, negra, etc.), perfiles de glucosinolatos y compuestos exclusivos (macamidias, macaenos), y se realizaron ensayos sobre efectos en fertilidad, energía y parámetros metabólicos. Revisiones contemporáneas subrayan que distintos fenotipos/colores presentan variaciones químicas que probablemente expliquen diferencias en efectos biológicos y uso clínico. Además, trabajos recientes hacen revisiones críticas sobre

qué afirmaciones nutricionales y terapéuticas están mejor sustentadas (Minich *et al.*, 2024).

En años recientes (finales de 2010s y 2020s) la geografía y la escala de producción cambiaron: algunos países (ej. China) comenzaron a cultivar maca en altitudes adecuadas, generándose debates sobre “biopiratería”, patentes y la necesidad de marcos de acceso y reparto de beneficios (Nagoya Protocol y acciones de Perú). Paralelamente crecieron estudios bibliométricos y de monitoreo que muestran un aumento sostenido de la producción científica sobre maca (agricultura, fitoquímica, farmacología) y una participación internacional creciente en la investigación. Un análisis bibliométrico reciente brinda panorama de tendencias y actores institucionales en la investigación sobre maca (Li *et al.*, 2025).

Al mismo tiempo, la expansión de monocultivos intensivos y la reducción de ciclos de barbecho han traído problemas agronómicos y de sostenibilidad: investigaciones recientes en Junín muestran que la práctica de monocultivo continuo puede agotar nitrógeno y boro, aumentar conductividad eléctrica y sodio intercambiable y disminuir la calidad del suelo, lo cual exige estrategias de manejo (rotación, enmiendas, recuperación de suelos) para sostener la producción a pequeño y mediano plazo. Estos retos agronómicos son centrales para la viabilidad futura del cultivo en su área tradicional (Solórzano-Acosta., 2025).

b. Importancia de su cultivo

La maca es nutricionalmente relevante: su hipocótilo contiene fibra, aminoácidos esenciales, ácidos grasos y minerales (hierro, calcio, cobre, zinc) que la convierten en un alimento energético y fuente de micronutrientes en dietas andinas con recursos limitados. Por su perfil nutricional se la ha estudiado tanto como alimento tradicional como ingrediente funcional en productos procesados (Peres, 2020).

Desde la perspectiva de la salud pública y la fitoterapia, la maca ha mostrado potencial en diversos ámbitos — fertilidad masculina, libido, alivio de síntomas menopáusicos, reducción de fatiga y efectos antioxidantes/

antiinflamatorios — aunque muchas conclusiones requieren ensayos clínicos más amplios y de mejor calidad metodológica para establecer indicaciones firmes. Por tanto, su valor radica tanto en las evidencias prometedoras como en la necesidad de investigación clínica adicional (Del Carpio *et al.*, 2024; Huerta-Ojeda *et al.*, 2024).

Económica y socialmente, el cultivo de maca ha generado una fuente de ingresos importante para comunidades de la meseta de Junín y otras áreas altoandinas: la expansión del mercado de exportación en las últimas décadas transformó cadenas de valor locales, elevó precios y generó oportunidades comerciales, aunque también originó problemas de acceso para consumidores locales y tensiones por la apropiación de beneficios. Esto convierte a la maca en un cultivo estratégico para la economía rural andina, con efectos directos sobre medios de vida y comercio internacional (Gonzales, 2011).

Culturalmente, maca es parte del patrimonio biocultural andino: su uso tradicional, su integración en prácticas alimentarias y ceremoniales y su rol en intercambios históricos la hacen un recurso vinculado a identidad y conocimiento local. El reconocimiento de la maca como cultivo de valor nacional y la discusión sobre acceso y repartición de beneficios (por ejemplo, frente a cultivo fuera de Perú) subrayan la importancia de proteger saberes tradicionales y asegurar beneficios para las comunidades productoras (Gonzales, 2011).

c. Origen etimológico de la maca

El término “maca” tiene origen en las lenguas quechuas habladas en la meseta central de los Andes peruanos. Diversos autores señalan que proviene del quechua “ma” (probablemente relacionado con “alimentar” o “fuerza”) y “ca” (posiblemente “altura” o “energía”), aunque la etimología exacta no está completamente consensuada. En la tradición oral, “maca” se ha interpretado como “alimento de las alturas” o “alimento que da fuerza”, lo que coincide con el contexto cultural y ecológico del cultivo (Gonzales, 2011).

Algunos lingüistas han propuesto que la raíz del término podría estar vinculada al aimara, lengua también hablada históricamente en zonas altas del centro-sur peruano. En esta perspectiva, “maka” podría derivar de términos relacionados con tubérculos o raíces comestibles, reforzando la idea de una denominación ancestral previa a la expansión del quechua como lengua franca. Estas hipótesis lingüísticas aparecen en discusiones sobre terminología botánica andina y los procesos de contacto lingüístico entre quechua y aimara. (Heggarty & Beresford-Jones, 2010).

En documentos coloniales tempranos (siglo XVI), cronistas como Cieza de León y Cobo emplean la palabra “maca” para referirse al hipocótilo seco y su uso alimenticio, mostrando que el término ya estaba consolidado en la lengua local mucho antes de la llegada de los españoles. El uso escrito en crónicas confirma la continuidad del vocablo desde el periodo prehispánico hasta la actualidad, preservando su pronunciación y sentido original (Cobo, 1964).

2.3.2 Botánica de la maca

Morfológicamente, la planta presenta una roseta basal de hojas enteras o lobuladas, con pecíolos largos y láminas de hasta 12 cm de largo. El tallo floral es erecto y ramificado, con inflorescencias racimosas que portan flores pequeñas, hermafroditas, de color blanco a crema. Cada flor posee cuatro pétalos, cuatro sépalos y seis estambres, característicos de la familia Brassicaceae. El fruto es una silicua de aproximadamente 4–5 mm que contiene semillas pequeñas y elípticas, de color pardo claro (Quiroz & Aliaga, 1997).

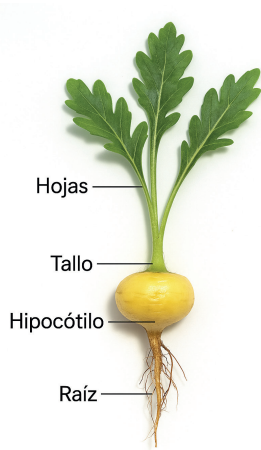
El órgano de almacenamiento, denominado hipocótilo-tubérculo, es el principal producto cosechado. Su forma y color varían según la variedad (amarilla, roja, negra, entre otras), con diámetros entre 2 y 8 cm y pesos que oscilan de 10 a 100 g. Este engrosamiento resulta de la acumulación de reservas nutritivas y metabolitos secundarios (glucosinolatos, macamidas, macaenos), fundamentales para su valor nutricional y medicinal (Minich *et al.*, 2024).

En su ciclo de cultivo, la maca germina entre 15 y 30 días después de la siembra, desarrolla la parte aérea en los primeros 3–4 meses, y completa la maduración del hipocótilo-tubérculo a los 7–9 meses. Su polinización es principalmente anemófila (por viento), aunque también puede ocurrir autofecundación. Las semillas mantienen su viabilidad durante varios años si se almacenan en condiciones secas y frescas, permitiendo su conservación y uso en campañas agrícolas posteriores (Hermann & Bernet, 2009).

a. Clasificación taxonómica de la maca

La maca (*Lepidium meyenii* Walp.) pertenece al reino Plantae, dentro del filo Tracheophyta (plantas vasculares), y a la clase Magnoliopsida (dicotiledóneas). Estas categorías reflejan su condición de planta vascular con semillas y cotiledones, típica de las angiospermas dicotiledóneas. A nivel de clasificación más específica, la especie se incluye en el orden Brassicales (antes denominado Capparales en algunas fuentes), dentro de la familia Brassicaceae (la familia de las crucíferas o mostazas). Este grupo incluye plantas con flores características y, a menudo, con compuestos sulfurados. Dentro de la familia, la maca está en el género *Lepidium*, que agrupa especies herbáceas como el berro o “pepperweed”. El nombre científico completo es *Lepidium meyenii* Walp., descrita formalmente en 1843 por el botánico Gerhard Walpers. Algunas clasificaciones incluyen niveles taxonómicos adicionales, como la tribu Lepidieae, a la que pertenece el género *Lepidium*, y en ciertos esquemas también una subclase Dilleniidae, aunque su uso puede variar según el sistema taxonómico. Se reconoce además que existen sinónimos taxonómicos de *Lepidium meyenii*. Entre ellos: *Lepidium peruvianum* (Chacón), *Lepidium affine*, *Lepidium gelidum*, *Lepidium weddellii*, entre otros. El uso de *L. peruvianum* ha sido propuesto por algunos autores para distinguir variantes cultivadas, aunque no es ampliamente aceptado (Chacón, 1990).

Figura 1 - Morfología de la maca.



Morfología de la maca

Figura 2 - Ecotipos de maca.



2.3.3 Cultivo de la maca

a. Clima

La maca se desarrolla de forma óptima en las altas mesetas andinas (subregión de puna), típicamente entre los 3 800 y 4 500 msnm, en zonas frías y secas, con lluvias concentradas en verano (enero a marzo) y heladas frecuentes durante el invierno (junio a agosto). La biotemperatura anual se sitúa entre 0 °C y 8 °C, con máximas alrededor de 15 °C y mínimas hasta -10 °C, y condiciones que incluyen fuertes vientos, alta radiación solar y suelos pobres y ácidos. En condiciones observadas en invernaderos en Junín, Perú, la maca como planta C₃ requiere temperaturas diurnas entre 15 °C y 25 °C, con iluminación óptima entre 10 klux y 40 klux para una fotosíntesis eficiente. En campo abierto, las temperaturas extremas (noches de -7 °C a -10 °C y tardes de 15 °C a 22 °C), la alta irradiación, lluvias irregulares y suelos con baja materia orgánica limitan su crecimiento (Calderón Rodríguez *et al.*, 2018).

En su hábitat natural, se registra que la maca puede soportar heladas nocturnas, radiación UV intensa y déficit hídrico, factores típicos de condiciones andinas extremas. Su adaptación refleja una gran resistencia al estrés ecológico, pero también indica por qué es un cultivo difícil de trasladar a ambientes más cálidos o templados sin controlar cuidadosamente la temperatura, humedad y radiación (Sifuentes-Penagos *et al.*, 2015).

En conjunto, el clima idóneo para la maca implica: altitudes entre 3 800-4 500 msnm, biotemperaturas bajas (0-8 °C), grandes amplitudes térmicas entre el día y la noche, frecuencia de heladas, lluvias estacionales en verano, suelos ácidos, y alta radiación solar. La replicación de este microclima es el mayor desafío para su cultivo fuera de los Andes.

b. Distribución geográfica

La maca se cultiva tradicionalmente en la meseta central de los Andes peruanos, particularmente en los departamentos de Junín y Pasco, alrededor del lago Chinchaycocha (Meseta de Bombón), a altitudes entre 4 000 y 4 500 metros sobre el nivel del mar. En estas condiciones fue

domesticada hace más de 2 000 años y actualmente continúa siendo su principal región de producción (Gonzales, 2011).

Si bien su uso y cultivo se concentran en Perú, se han registrado presencias marginales en países vecinos, como Bolivia, donde se cultiva de forma experimental en zonas altoandinas; también se ha mencionado su cultivo en otros países andinos, e incluso se reportan casos de maca cultivada en regiones de China como Yunnan, Tibet, Jilin, aunque fuera de su hábitat original (Wang et al., 2019).

En cuanto a expansión histórica moderna, la maca comenzó a experimentar un auge exportador desde los años 1990, lo que llevó a su introducción experimental en zonas altas fuera de Perú, especialmente en Bolivia; sin embargo, la extensión real del cultivo permanece limitada y su producción masiva sigue concentrada en Perú (Li et al., 2019).

c. Tecnología de producción

La producción tradicional de hipocótilos de maca sigue un ciclo bienal con dos fases principales: una fase vegetativa de unos 8–9 meses para el desarrollo del tubérculo, seguida por una fase reproductiva de aproximadamente 5 meses para la obtención de semillas, separadas por una interfase de reposo de unos 2–2,5 meses. La siembra se realiza al voleo sobre suelos descansados (purum), aprovechando las primeras lluvias, y las labores principales incluyen deshierbes y cosecha manual con pico (cashu). El secado al sol posterior puede ocasionar pérdidas significativas de entre 30 % y 50 %. La preparación del terreno implica labores como desterronado manual o mecanizado (cushpeo), enmienda de suelos ácidos con cal agrícola (aproximadamente 500 kg/ha para levantar el pH hacia 6,5-7,5), y distribución de semillas —ya sea puras (3 kg/ha) o como mezcla (“pusha”, del 25 % al 45 %), que se cubren y compactan mediante pisoteo animal o rastrillado. El método de siembra preferido sigue siendo al voleo temprano en la mañana para evitar pérdidas por viento. La postcosecha tradicional comienza con el secado al sol del hipocótilo para reducir su humedad al 30-35 %, seguido de un secado más rápido en túneles plásticos ventilados por 10–15 días hasta alcanzar una humedad final ideal del 13 % para almacenamiento y comercialización. Este proceso afecta

la calidad físico-química del producto y tiene costos laborales elevados, especialmente si el clima es variable (UNALM, 2025).

En producción bajo condiciones controladas (invernadero), se ha implementado un paquete tecnológico que incluye trasplante de plántulas, riego por goteo, aplicación de guano fermentado y cultivo horizontal (en lugar de vertical). Este sistema ha demostrado producir hasta 3,5–4 veces más rendimiento de hipocótilo fresco y acortar el ciclo vegetativo, permitiendo dos campañas al año, aunque los promotores microbianos (PGPR) no mostraron un efecto adicional (Calderón Rodríguez & Cáceres Cunto, 2018).

Finalmente, el manejo sostenible del cultivo exige prácticas para evitar la degradación del suelo por monocultivo continuo. En la meseta de Junín, se han reportado periodos continuos de siembra de hasta 9 años sin rotación ni enmiendas, lo que agota materia orgánica, fósforo y potasio disponibles, y acidifica el suelo. Solo el 20 % de productores practica rotación con gramíneas o leguminosas, o aplica fertilizantes orgánicos, lo cual es esencial para sostener la productividad a largo plazo (Solorzano-Acosta *et al.*, 2024).

d. Obtención de semilla botánica

La obtención de semilla botánica de maca ha sido abordada mediante procesos de selección individual de morfotipos en ambientes de alta altitud, como Pasco (3 300 y 4 000 msnm). En estos estudios, se evaluaron seis morfotipos (negro, blanco, rojo, amarillo, plomo y rosado) en su segunda generación, con enfoque en homogeneidad genética y viabilidad. La productividad de hipocótilos frescos fue 50 % mayor a 4 000 msnm que a 3 300 msnm, y se estimó que el rendimiento debe superar los 4 400 kg/ha para asegurar rentabilidad (Villaorduña-Caldas *et al.*, 2020).

La propagación de la maca se realiza principalmente a través de semillas botánicas obtenidas de plantas seleccionadas, las cuales se transplantan tras la cosecha a parcelas enriquecidas con abono antes de permitir la formación de semilla. Se emplea siembra mediante mezcla con tierra fina

y compactación mediante paso de ovinos, con una densidad aproximada de 300 kg de semilla por hectárea; el ciclo vegetativo para cosecha de semillas tarda entre 8 y 10 meses (Appropedia, s. f.).

En el desarrollo de técnicas mejoradas, se ha explorado la pelletización de semillas con bacterias promotoras del crecimiento (como *Pseudomonas* sp. LMTK32), obtenidas a gran escala en biorreactor con medios optimizados (sucrosa, glutamato). Esta tecnología permitió aumentar notablemente los CFU viables (hasta 1.28×10^{11} CFU/mL) y mejoró la germinación de semillas tratadas, ofreciendo una alternativa biotecnológica para potenciar la propagación de maca (Guerra López & Zúñiga Dávila, 2018).

Por otro lado, estudios in vitro han evaluado métodos de inducción de callo y regeneración de planta mediante cultivo de tejidos con medios MS suplementados con reguladores de crecimiento como cinetina, ácido naftalénacético (ANA) y 2,4-D. Estas técnicas apuntan a la propagación de genotipos valiosos y la conservación de germoplasma, ofreciendo una vía complementaria a la obtención de semilla tradicional (Kahrizi et al., 2023).

e. Plagas y enfermedades

En áreas tradicionales de cultivo como Puno, se ha identificado al gorgojo de los Andes (*Prennotrypes* sp.) como una de las plagas más significativas. Sus larvas blancas penetran el hipocótilo y forman galerías, afectando el almacenamiento de nutrientes y reduciendo la productividad. Los adultos también consumen hojas, lo que limita la capacidad fotosintética de la planta. Las medidas recomendadas incluyen preparar adecuadamente el terreno, rotar cultivos y evitar monocultivos consecutivos (Bravo, 2001).

Además, se reporta daño por la mosca de la raíz, cuya larva mastica los tejidos de la raíz, ocasionalmente afectando también la corona. Este ataque reduce la integridad del hipocótilo y deteriora su calidad; la prevención incluye manejo adecuado del suelo, deshierbe frecuente y cosecha a tiempo (Bravo, 2001).

Entre las enfermedades fúngicas, se destaca *Peronospora parasítica*, conocida localmente como "pluma blanca". Afecta principalmente el follaje,

provocando amarillamientos y la aparición de un micelio pulverulento grisáceo; puede causar la muerte de la planta. La prevención efectiva incluye el uso de rotación de cultivos, siembra en terrenos descansados y el empleo de semilla certificada (Bravo, 2001).

Otras enfermedades incluyen *Fusarium gramineum* y *Rhizoctonia solani*, que también provocan afectaciones en hojas e hipocótilos, aunque en general el ataque es limitado. No obstante, su presencia subraya la importancia de monitorear constantemente el cultivo y aplicar prácticas preventivas como rotación y control cultural (Aliaga, 2004).

Por último, se enfatiza que, aunque los agroproductores utilizan pocos pesticidas—inclusive solo alrededor del 12%—la combinación de rotación, preparación adecuada del terreno y sistemas de vigilancia fitosanitaria constituye el enfoque más eficiente para manejar plagas y enfermedades de manera integrada (Solórzano-Acosta *et al.*, 2025).

f. Fenología de la maca

La maca presenta un ciclo fenológico que generalmente abarca dos fases: una fase vegetativa, destinada al crecimiento del hipocótilo, de cerca de 8 a 9 meses, y una fase reproductiva de aproximadamente 5 meses, en la cual se producen inflorescencias, floración, polinización y fructificación. Posteriormente, sigue un periodo de reposo tras la cosecha. Esta distribución refleja su naturaleza bienal, aunque en altitudes o condiciones favorables puede completarse en un año (Aliaga, 2004).

En condiciones costeras de cultivo experimental en Trujillo (Perú), donde el ciclo puede acelerarse, se ha determinado que la fase reproductiva —desde la emergencia de plántulas hasta la fructificación y producción de semilla— tiene una duración de aproximadamente 68 días. Esto indica una posible adaptación al cultivar en zonas fuera de su hábitat tradicional (López Medina *et al.*, 2021).

La fenología de la maca durante su desarrollo incluye: germinación, aparición de hojas cotiledonales, formación de dos hojas verdaderas, desarrollo de la roseta foliar, y engrosamiento del hipocótilo como órgano

de almacenamiento. Durante la fase reproductiva, se generan inflorescencias racimosas, flores y posteriormente frutos tipo silícula que contienen semillas, generalmente dos por fruto (Aliaga, 2004).

El fotoperiodo también influye en el desarrollo: bajo condiciones de día largo (long-day), el crecimiento radicular (longitud del sistema radicular fino) y el engrosamiento del hipocótilo se estimulan más que en condiciones de día corto (short-day), especialmente durante las etapas tempranas de desarrollo. Esto sugiere que el fotoperíodo contribuye a modular ciertos aspectos del ciclo fenológico vegetativo (Zaytseva *et al.*, 2022).

g. Tipo de suelos para maca

La maca puede cultivarse en diferentes texturas de suelo —desde suelos ligeros (arenosos), pasando por medios (franco), hasta suelos pesados (arcillosos)— siempre y cuando tengan buen drenaje, un pH que varía desde el ligeramente ácido hasta el alcalino, y suficiente humedad. Es capaz de crecer incluso en suelos pobres debido a su alta adaptabilidad. En las áreas tradicionales de cultivo (Meseta de Bombón, Junín), los suelos predominantes son Cambisoles —suelo joven con horizonte Bw que contiene acumulaciones de arcilla, óxidos de hierro y aluminio— típicos de regiones montañosas. Estos suelos presentan buen drenaje, textura adecuada y un pH cercano a la neutralidad, lo que favorece las condiciones requeridas para la maca (Solórzano-Acosta *et al.*, 2025).

Aunque la maca se cultiva en suelos ácidos, se ha observado un mejor desempeño en suelos con pH cercano a la neutralidad, particularmente en suelos tipo arena (arenosos con buen drenaje y nutrición moderada). Este tipo de suelo permite una buena aireación y desarrollo del hipocótilo, y facilita el manejo nutricional. En otro enfoque agronómico, se ha descrito que la maca prospera mejor en suelos ricos en materia orgánica y ligeramente ácidos, una condición que promueve una mejor absorción de nutrientes y desarrollo fisiológico del hipocótilo (Gonzales *et al.*, 2009).

h. Mejoramiento genético de la maca

La planta de maca presenta ocho veces el número básico de cromosomas ($2n = 8x = 64$), lo que indica que es una especie octoploide. Se han

identificado dos eventos de duplicación genómica completa (whole-genome duplications, WGD) específicos de maca hace aproximadamente 6,7 millones de años, que probablemente favorecieron su adaptación a condiciones extremas de alta altitud en los Andes, al diversificar genes relacionados con respuesta al estrés abiótico, señales hormonales y biosíntesis de metabolitos secundarios. Este conocimiento constituye la base molecular para su mejoramiento genético futuro (Zhang *et al.*, 2016).

Para apoyar estos esfuerzos, se ha desarrollado el Maca Genome Hub (MGH), una plataforma integral de información genómica y genética que reúne secuencias del genoma, anotaciones funcionales, datos de expresión, marcadores moleculares, visualizadores genómicos y herramientas bioinformáticas (como BLAST, JBrowse y análisis de sintenia). Esta infraestructura facilita el análisis comparativo, la identificación de genes candidatos, y la aplicación de estrategias avanzadas de mejoramiento y conservación genética de maca (Zhang *et al.*, 2018).

Desde el punto de vista agronómico y fenotípico, se ha explorado la variabilidad genética en accesiones locales, por ejemplo, en la Meseta de Bombón (Junín, Perú). Se estudiaron 138 accesiones usando marcadores AFLP y descriptores morfológicos del hipocótilo, identificando alta diversidad genética y fenotípica entre morfotipos, como distintos colores, formas y distribución del color. Esta variabilidad genética entre plantas es fundamental como fuente de germoplasma para programas de mejoramiento que busquen características estables y diferenciadas (Huaraca Meza, 2016).

i. Efecto de las heladas en la maca

La maca crece en ambientes andinos donde las temperaturas pueden descender hasta $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante la noche, lo que implica cierta tolerancia natural a las heladas. En áreas como la meseta y puna andina, la planta ha evolucionado para soportar estas extremas condiciones, lo que la convierte en una de las especies vegetales útiles más resistentes a heladas en su ecosistema. A pesar de estas vulnerabilidades en etapas tempranas, la maca adulta presenta una resistencia notable a condiciones climáticas

adversas como granizadas, sequías prolongadas y heladas intensas, lo que contribuye a su éxito como cultivo de altura desde épocas incaicas hasta hoy (Sifuentes-Penagos *et al.*, 2015).

Un estudio fisiológico realizado en condiciones de baja temperatura encontró que las semillas y plántulas jóvenes de maca tienen diferentes niveles de sensibilidad al congelamiento ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Las semillas de diferente color (amarillas, marrones, negras) presentaron tasas variables de germinación a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ —las amarillas germinaron más rápidamente—; las plántulas con 2–3 hojas fueron más susceptibles al daño por frío que las de 6 hojas, debido a menor concentración de prolina, lo que resultó en mayor mortalidad y reducción de pigmentos fotosintéticos. En resumen, aunque la maca adulta tolera bien las heladas gracias a su adaptación andina, la sensibilidad de semillas y plántulas a las bajas temperaturas —especialmente en coloraciones y etapas tempranas— puede afectar su establecimiento exitoso; por ello, los tratamientos de pre-germinación y selección de semillas más resistentes son fundamentales para asegurar una buena tasa de germinación y supervivencia (Janamapa Santome, 2016).

2.3.4 Valor nutricional de la maca

La maca destaca por su aportación en macronutrientes, especialmente hidratos de carbono complejos (mayores al 60 % del peso seco), proteínas de alta calidad y fibra dietética considerable. Además, contiene compuestos bioactivos importantes como almidón resistente, polisacáridos no amiláceos, polifenoles, macamidas, macaenes, glucosinolatos y alcaloides, que le confieren potenciales efectos funcionales (Wang & Zhu, 2019).

En cuanto a aminoácidos, los análisis de maca cultivada en diferentes regiones señalan que contiene entre 189 y 313 mg/g de aminoácidos esenciales (EAA), y entre 634 y 942 mg/g de no esenciales (NEAA), lo que refleja una proporción EAA/TAA de aproximadamente 21 % a 28 %, destacando como una buena fuente proteica con perfil nutricional completo (Chen *et al.*, 2017).

Respecto a minerales, la maca es especialmente rica en potasio (entre 5 394 y 8 063 mg/kg en peso seco), seguida por calcio (3 839–4 502 mg/kg), magnesio (625–837 mg/kg), sodio, hierro (58–550 mg/kg), zinc, manganeso y cobre en concentraciones menores. También contiene diversos alcaloides (macamidas, imidazólicos, β -carbolinas, etc.) y compuestos volátiles

(isotiocianatos, cloro-compuestos, entre otros), lo que contribuye a su perfil nutricional funcional (Jagdale *et al.*, 2021).

Comparaciones entre muestras de maca procedentes de China y Perú evidencian variaciones en la composición mineral: los niveles de cobre y sodio tienden a ser más elevados en muestras chinas (cobre: hasta 31 mg/kg; sodio: hasta 2 600 mg/kg), mientras que los contenidos de boro, cobalto, cromo, litio, níquel y zinc oscilan en rangos similares según la procedencia geográfica (Zhang *et al.*, 2015).

2.3.5 La maca y la producción animal

En estudios recientes, la adición de maca en polvo al 0,05 % y 0,1 % en la dieta de codornices japonesas (*Coturnix coturnix japonica*) mostró un aumento significativo en el consumo de alimento y, especialmente, una reducción de muertes embrionarias junto a una mejora en la calidad de los polluelos; sin embargo, no se observaron efectos positivos en el crecimiento, rendimiento de canal o producción de huevos a corto plazo. Esta mejora se atribuye posiblemente a los compuestos bioactivos como macamidas, glucosinolatos y fenoles presentes en la maca (Turgud *et al.*, 2022).

Otro estudio enfocó en codornices ponedoras envejecidas, y encontró que añadir 1 g/kg de maca al alimento mejoró la calidad de la cáscara de huevo, la morfología del íleon y características óseas, además de reducir significativamente los niveles de colesterol sérico. También se observó un incremento en la concentración de testosterona con 2 g/kg de maca, lo que sugiere efectos potencialmente beneficiosos en aves de postura avanzada (Gül, 2022).

En el caso de perros machos (normofértiles y subfértiles), la suplementación oral diaria con extracto de maca (75 mg/kg) resultó en mejoras notables en el volumen del eyaculado, recuento total de espermatozoides, motilidad (total y progresiva) y morfología espermática en ambos grupos, lo que sugiere un papel potencial en la mejora de la calidad seminal (Gattuso *et al.*, 2024).

En estudios preliminares con conejo o ganado, se ha reportado un efecto positivo general sobre el rendimiento productivo, la ingesta de alimento y la conversión alimenticia al suplementar con extracto o polvo de

maca. No obstante, los detalles específicos (como dosis y variables evaluadas) requieren mayor documentación para fundamentar su uso (Ragab *et al.*, 2023).

Asimismo, se han realizado ensayos para evaluar los efectos de maca como aditivo en la dieta de corderos destetados y carneros, aunque los resultados completos aún no están publicados en medios de acceso general. El enfoque parece centrarse en el crecimiento y características seminales; serán útiles futuras publicaciones para valorar su valor agronómico (Mahdy *et al.*, 2023).

2.3.6 Preparación de comidas y dulces a base de maca

La maca en polvo es muy versátil y se utiliza ampliamente para crear batidos, smoothies y bebidas calientes. Puede incorporarse a jugos, avena o café matutino para mejorar la energía o añadir nutrientes extras sin alterar demasiado el sabor (Ruder, 2023).

Entre las preparaciones dulces populares están los barristas de maca con chocolate o mantequilla de maní, mousses veganos, pudines de cacao, barras energéticas y trufas —muchas de ellas sin gluten y aptas para dietas veganas—, que aprovechan el sabor natural de la maca para realzar postres saludables (HerbaZest Editorial Team, 2024).

El consumo tradicional incluye jugo de maca y mazamorra, obtención de un líquido espeso que luego se seca y mezcla con leche como ponche. Asimismo, se consume maca asada (generalmente en huatia) y también como harina para elaborar panes, pasteles y galletas (Buenazo.pe, 2023).

Recetas contemporáneas incluyen el Miracle Maca Latte, una bebida suave y especiada tipo café con leche —similar a un chocolate caliente con notas de cúrcuma y canela— compatible con dietas veganas o paleo (40 Aprons, 2024).

2.4 Definición de términos

2.4.1 Variable dependiente

Es la variable que se desea explicar o predecir. El rendimiento del cultivo de maca (kg/ha).

2.4.2 Variable independiente

Son los factores que pueden influir en la variable dependiente. En esta investigación serían la temperatura, humedad relativa y precipitación.

2.4.3 Correlación

Mide el grado de asociación lineal entre dos variables. Se representa con el coeficiente r (de Pearson si es lineal), que varía entre -1 y 1.

2.4.4 Regresión lineal simple

Modelo estadístico que analiza la relación entre una variable dependiente y una variable independiente.

2.4.5 Regresión lineal múltiple

Amplía la regresión simple para incluir dos o más variables independientes. En esta investigación, temperatura, humedad y precipitación juntas.

2.4.6 Coeficiente de determinación (R^2)

Indica qué proporción de la variabilidad de la variable dependiente es explicada por el modelo de regresión. Va de 0 a 1.

2.4.7 Significancia estadística (valor p)

Evalúa si la relación observada entre variables es estadísticamente confiable. Un valor $p < 0.05$ suele indicar significancia.

2.4.8 Multicolinealidad

Problema que ocurre cuando las variables independientes están muy correlacionadas entre sí. Afecta la fiabilidad del modelo de regresión múltiple.

2.4.9 Error estándar de la estimación

Mide la precisión de las predicciones del modelo. Un error menor indica un mejor ajuste del modelo.

2.4.10 Residuos (residuals)

Son las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el modelo. Analizarlos permite validar el ajuste del modelo.

3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

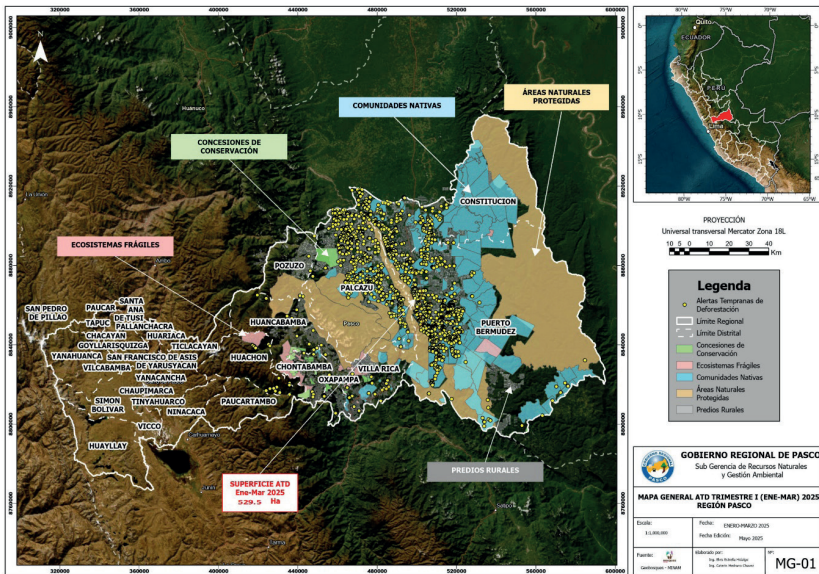
3.1 Tipo y diseño de investigación

Descriptivo–correlacional, longitudinal, no experimental.

3.2 Variables

Dependiente: rendimiento, independientes: temperatura, humedad, precipitación.

Figura 3 - Mapa de ubicación de la región Pasco.



Fuente: SINIA/MINAM (licencia CC BY 4.0).

La figura 3 muestra las zonas altas donde se produce el cultivo de maca, distritos como Ninacas y Vicco, cercanos a la laguna de Chinchaicocha.

3.3 Población, muestra, muestreo, unidad de análisis

Los datos fueron tomados de los archivos en físico del Ministerio de Desarrollo Agrario (Midagri) región Pasco del año 2002 al 2014 y del año 2015 al 2024 de la página web del Sistema Integral de Estadística Agraria, perfil productivo (https://siea.midagri.gob.pe/siea_bi/).

Los datos meteorológicos fueron solicitados al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI para los años 2002 a 2016 fueron recogidos vía correo electrónico y del 2017 al 2024 fueron extraídos de la página web del SENAMHI (<https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>)

a) Producción agrícola (rendimiento y área de maca)

Diseño: Censo temporal de datos secundarios.

Población objetivo: Producción anual de maca en la región Pasco.

Marco muestral: Registros oficiales anuales de superficie y rendimiento (series históricas regionales).

Unidad de observación: Año calendario.

Criterios de inclusión/exclusión

Se incluyen todos los años con registros oficiales completos dentro de 2002–2024.

Se excluyen años con datos manifiestamente atípicos por error de captura o sin trazabilidad (p. ej., inconsistencias internas $> \pm 30\%$ frente a fuentes espejo).

Cuando existan dos fuentes para el mismo año, se prioriza la serie con mayor continuidad y metadatos (definiciones, metodología).

Tratamiento de vacíos y control de calidad

No se imputa rendimiento si faltan simultáneamente área o producción (evita sesgos).

Se realiza contraste de coherencia: producción \approx área \times rendimiento (tolerancia $\pm 5\%$).

Se documentan ajustes en un anexo de depuración (bitácora de cambios).

Justificación del censo temporal: al haber un número manejable de periodos (23 años), levantar todos los años válidos reduce error muestral y evita sesgos de selección propios del muestreo probabilístico.

b) Variables climáticas (temperatura, humedad y precipitación)

Diseño: Muestreo intencional con criterios técnicos (purposive) de estaciones/series climáticas representativas del entorno de cultivo.

Criterios de selección de estaciones/series

Representatividad agroecológica: altitud 3 800–4 500 m s. n. m. y emplazamiento en cuencas donde efectivamente se produce maca.

Proximidad espacial: distancia ≤ 50 km a las principales zonas productoras; si hay múltiples estaciones, se calcula promedio ponderado por inversa de la distancia (IDW).

Continuidad temporal: $\geq 85\%$ de datos disponibles entre 2002 y 2024.

Calidad: series con metadatos (cambio de ubicación, instrumentos, recalibraciones).

Reglas operativas

Falta de datos $\leq 15\%$ en un año: se completa con la estación alterna más cercana (IDW).

Falta $> 15\%$: el año se marca como “dato climático no robusto” y se usa solo en análisis descriptivo, no en regresión.

Justificación del muestreo intencional: maximiza la validez externa (condiciones reales del altiplano pasqueño) cuando no hay una red completamente homogénea de estaciones y se requiere continuidad larga.

c. Justificación del periodo 2002–2024

- Disponibilidad y homogeneidad estadística.

A partir de 2002 se cuenta con series regionales más estables y comparables (definiciones y coberturas consistentes), lo que mejora la calidad longitudinal. Incluir periodos previos introduce quiebres metodológicos que afectarían la comparabilidad.

- Cobertura suficiente para detectar tendencias climáticas.

Ventana de 23 años: supera el mínimo operativo (≥ 20) recomendado para explorar tendencias débiles en clima de altura y su asociación con la productividad.

- Captura de fases clave del mercado de maca.

El intervalo incluye:

Pre-expansión (2002–2010),

Ajuste (2011–2014),

Boom de siembras y precios (2015–2016),

Normalización y reacomodo (2017–2024).

Esto permite identificar respuestas productivas a choques de demanda y oferta, no solo a clima.

- Cierre más reciente disponible.

2024 es el último año con datos consolidados al momento del estudio, garantizando actualidad sin sacrificar calidad (dato cerrado).

- Balance señal-ruido.

Períodos más cortos (p. ej., 2010–2024) elevan varianza y sesgo por eventos extremos; períodos mucho más largos acumulan quiebres metodológicos. 2002–2024 optimiza el compromiso entre continuidad, calidad y relevancia.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se puede detallar que los datos se recolectaron de fuentes oficiales (MIDAGRI, SENAMHI) mediante registros históricos y validados estadísticamente en Excel y SPSS.

3.5 Procedimientos

Flujo: obtención de datos → limpieza → análisis descriptivo → correlación → regresión → proyecciones.

3.6 Métodos de análisis de datos

Pruebas: regresión lineal simple, regresión lineal múltiple, prueba de Mann-Kendall, PCA (si lo agregas).

3.7 Aspectos éticos

El presente estudio se desarrolló bajo principios éticos que garantizan la transparencia, integridad y responsabilidad en el manejo de la información. La investigación se fundamentó en el uso de fuentes oficiales y bases de datos institucionales, tales como registros de producción agrícola, estadísticas meteorológicas y documentos técnicos publicados por entidades gubernamentales y académicas.

En todo momento se respetó el principio de transparencia en el uso de datos oficiales, lo que implica:

Referenciar de manera explícita las fuentes de información utilizadas, evitando la manipulación indebida de cifras.

Presentar los datos tal como fueron publicados por las instituciones responsables, sin alteraciones que pudieran distorsionar la interpretación de los resultados.

Garantizar que las proyecciones, análisis estadísticos y representaciones gráficas sean claramente diferenciadas de los datos originales, preservando así la claridad entre la información oficial y los aportes analíticos propios de la investigación.

Asimismo, se cumplió con el respeto a la autoría de las bases de datos institucionales, reconociendo la labor de las entidades que generaron, validaron y difundieron los registros utilizados. Cada base de datos empleada fue debidamente citada conforme a las normas de la APA Séptima edición, asegurando la trazabilidad de las fuentes y el reconocimiento del trabajo de los equipos técnicos y científicos que las desarrollaron.

Este compromiso ético también se refleja en la decisión de poner a disposición los resultados de manera clara y verificable, de forma que puedan ser contrastados con futuras investigaciones y replicados en otros contextos. Se reconoce, además, que la información procesada corresponde a bienes públicos de acceso abierto, por lo que su uso debe estar orientado exclusivamente a fines académicos, de investigación y de apoyo al desarrollo sostenible de la agricultura altoandina.

4 RESULTADOS

4.1 Análisis estadístico

a. Estadística descriptivos

Tabla 1 - Producción de maca en la región Pasco periodo 2002 – 2024.

Año	Rendimiento (t/ha)	Área sembrada (ha)
2002	4.04	322
2003	3.70	537
2004	3.80	1138
2005	3.49	1349
2006	3.60	1058
2007	3.40	658
2008	3.10	230
2009	2.99	693
2010	2.88	297
2011	5.50	124
2012	3.15	249
2013	3.16	149
2014	1.77	151
2015	4.88	935
2016	4.86	1827
2017	5.01	1001
2018	5.31	190
2019	4.80	116
2020	4.44	273
2021	3.40	323
2022	4.59	279
2023	4.73	315
2024	4.08	534
2030	4.80 *	262.3 *

Fuente: MIDAGRI * estimado.

La producción de maca en Pasco durante el periodo 2002–2024 muestra una dinámica marcada por altas fluctuaciones en el rendimiento y el área cultivada, lo que refleja tanto la vulnerabilidad del cultivo a factores climáticos como la influencia de condiciones de mercado y prácticas agronómicas locales. En la primera fase (2002–2010), el rendimiento promedio osciló entre 2.88 y 4.04 t/ha, con un comportamiento relativamente inestable. El aumento del área cultivada en 2004 (1 138 ha) y 2005 (1 349 ha) no se tradujo en un incremento significativo del rendimiento, lo cual sugiere limitaciones tecnológicas y problemas de manejo extensivo en los suelos altoandinos. En 2008, se observa una caída drástica en área (230 ha) y rendimiento (3.10 t/ha), lo que coincide con reportes de heladas severas y baja inversión de los productores.

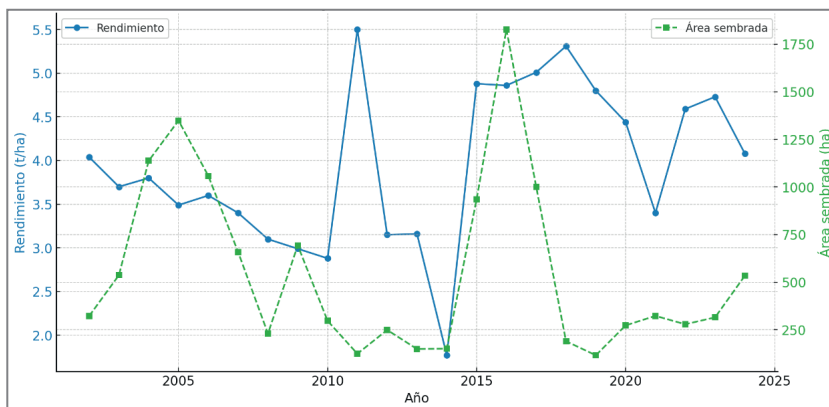
El periodo 2011–2016 constituye una fase de recuperación y expansión productiva, con un pico en 2011 (5.50 t/ha, aunque con solo 124 ha cultivadas) y un boom de siembra en 2015–2016, cuando el área alcanzó 935 ha y 1 827 ha respectivamente, con rendimientos altos (\approx 4.88–4.86 t/ha). Este comportamiento está directamente asociado al boom de precios internacionales de la maca en 2014–2015, lo que incentivó a los agricultores a ampliar significativamente la frontera agrícola. Entre 2017 y 2020, la tendencia muestra estabilidad relativa en rendimiento (\approx 5 t/ha) pero con fluctuaciones en el área. En 2018, el área se redujo drásticamente a 190 ha pese a mantener un alto rendimiento (5.31 t/ha), lo que refleja una contracción del mercado tras la sobreoferta de los años previos. En 2020, el área sembrada aumentó a 273 ha con un rendimiento aceptable (4.44 t/ha), sugiriendo un ajuste en la estrategia de los agricultores.

En los años más recientes (2021–2024), los valores muestran una fase de estabilización, con rendimientos entre 3.40 y 4.73 t/ha y áreas moderadas (279–534 ha). En 2024, el rendimiento fue de 4.08 t/ha con 534 ha cultivadas, lo que representa un punto medio en comparación con los extremos de expansión y contracción previos. Esto indica que la producción se ha asentado en un rango relativamente estable, aunque sujeto todavía a factores de mercado y variabilidad climática. La estimación al 2030 (rendimiento \approx 4.8 t/ha y área \approx 262 ha) sugiere un escenario de

estabilidad moderada, donde la maca se mantendría como un cultivo rentable en zonas específicas de Pasco, pero sin alcanzar nuevamente los niveles expansivos del boom de 2015–2016.

En conjunto, la Tabla 1 evidencia que la producción de maca en Pasco ha dependido más de factores coyunturales (precios internacionales, picos de demanda, crisis de sobreoferta) que de una tendencia sostenida de mejora tecnológica o adaptación climática. El comportamiento errático de la superficie cultivada y los rendimientos muestra la alta vulnerabilidad del cultivo frente a la variabilidad del mercado y la falta de planes de manejo sostenibles, lo que plantea la necesidad de fortalecer la tecnificación, rotaciones y políticas de apoyo a pequeños productores.

Figura 4 - Evolución del rendimiento y área sembrada de maca en Pasco (2002-2024).

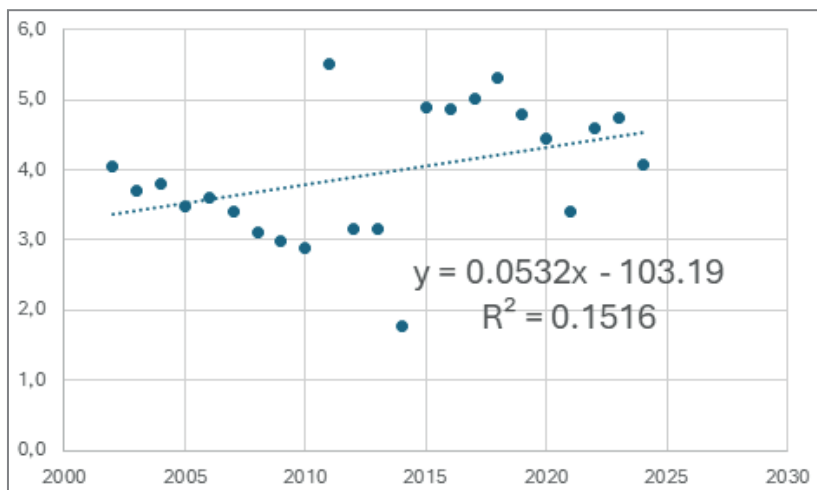


En la figura 4 se aprecia claramente el boom de siembra 2015–2016, donde el área crece de manera abrupta mientras el rendimiento se mantiene alto. En 2018 el área cae bruscamente, pero el rendimiento se mantiene elevado, evidenciando eficiencia en parcelas más reducidas.

En la última etapa (2021–2024), tanto rendimiento como área tienden a estabilizarse en valores intermedios.

b. Regresión lineal simple

Figura 5 - Regresión lineal entre el año y el rendimiento para estimar el rendimiento del año 2030.



La Figura 5 muestra la aplicación de un modelo de regresión lineal simple para analizar la evolución del rendimiento de la maca en la región Pasco a lo largo del periodo 2002–2024 y su estimación hacia el año 2030.

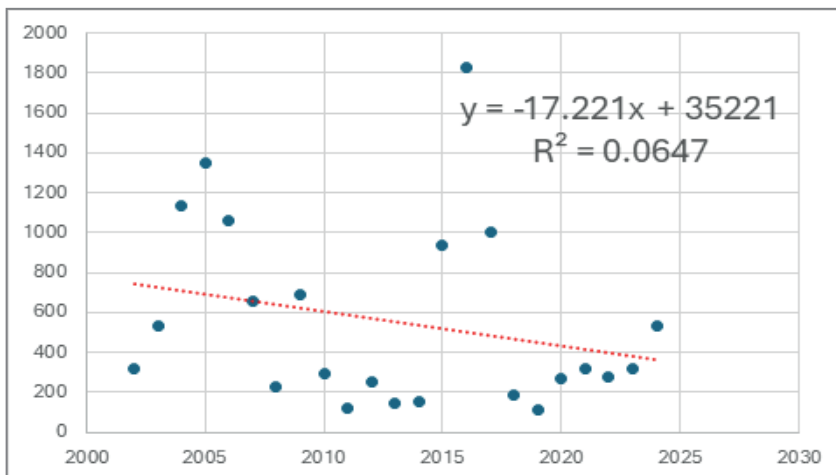
En el periodo analizado, los datos empíricos reflejan alta variabilidad interanual en el rendimiento, con valores que van desde un mínimo de 1.77 t/ha en 2014 hasta un máximo de 5.50 t/ha en 2011. Esta dispersión de valores confirma la influencia de factores externos como variabilidad climática, plagas, calidad del suelo y, en especial, los incentivos de mercado que han modulado las decisiones de siembra y el manejo agronómico.

La tendencia lineal ajustada indica una pendiente ligeramente positiva, lo que sugiere que, en promedio, el rendimiento de la maca en Pasco ha tendido a crecer en las últimas dos décadas. Sin embargo, el modelo refleja un coeficiente de determinación (R^2) bajo, lo que significa que el año por sí solo explica muy poco de la variación en los rendimientos; es decir, la mejora observada no responde a un proceso lineal de progreso tecnológico constante, sino a episodios coyunturales de expansión o contracción.

La proyección hacia 2030, basada en esta línea de tendencia, estima un rendimiento de aproximadamente 4.8–5.0 t/ha, lo que representa un valor medio-alto dentro del rango histórico observado. Esta estimación debe interpretarse con cautela: no implica que la producción siga un camino ascendente sostenido, sino que, si se mantienen condiciones similares a las del periodo analizado, el rendimiento podría estabilizarse alrededor de ese nivel.

Un aspecto clave de la figura es la identificación de años atípicos (outliers), como 2011 y 2014, que se apartan significativamente de la tendencia. Estos casos destacan la necesidad de incorporar en futuros modelos variables climáticas (temperatura, precipitación, humedad) y socioeconómicas (precios internacionales, demanda de exportación, uso de tecnología) para explicar de manera más robusta las fluctuaciones. Por ello, la proyección al 2030 debe asumirse como una aproximación indicativa, útil para visualizar un escenario de estabilidad relativa, pero insuficiente para planificar políticas agrarias sin considerar las múltiples variables que influyen en la producción de este cultivo emblemático.

Figura 6 - Regresión lineal entre el año y el área cultivada para estimar el área del año 2030.



La Figura 6 presenta el comportamiento histórico del área cultivada con maca en la región Pasco durante el periodo 2002–2024 y su proyección al año 2030 mediante un modelo de regresión lineal simple.

El análisis revela que el área cultivada ha experimentado fuertes oscilaciones, con picos de expansión y contracción que reflejan la alta sensibilidad del cultivo a factores externos. Entre 2002 y 2005 se observa una etapa de crecimiento progresivo, alcanzando un máximo de 1 349 ha en 2005, lo que puede asociarse con un interés creciente por el cultivo en mercados locales y nacionales. Sin embargo, en los años posteriores se registran caídas drásticas, como en 2008 (230 ha), reflejando posiblemente problemas de sobreoferta, condiciones climáticas adversas o falta de incentivos de mercado.

El periodo 2015–2016 constituye un momento atípico y decisivo en la serie: la superficie sembrada alcanzó un récord de 1 827 ha en 2016, coincidiendo con el boom de la maca en mercados internacionales, cuando la demanda externa y los precios elevados incentivaron una expansión masiva de siembras. Este auge, sin embargo, fue transitorio: en los años siguientes, la superficie cayó de manera abrupta, llegando a apenas 116 ha en 2019, lo que evidencia la vulnerabilidad de los agricultores frente a la volatilidad de los precios internacionales y a las dificultades para sostener altos niveles de producción sin un mercado estable.

En el periodo reciente (2020–2024), el área sembrada parece haber entrado en una fase de estabilización, con valores que fluctúan entre 273 y 534 ha. Esto sugiere que los agricultores han ajustado su estrategia productiva, manteniendo una superficie moderada que permite abastecer el mercado sin incurrir en el riesgo de sobreproducción.

La tendencia lineal proyectada hacia el 2030 muestra una superficie estimada de aproximadamente 164–262 ha, lo que implica una contracción progresiva respecto a los valores observados en las últimas dos décadas. Esta proyección indica que, de mantenerse las condiciones actuales, la maca tenderá a ocupar áreas más reducidas en Pasco, probablemente

concentrándose en zonas específicas de mayor aptitud agrícola y en productores con acceso a mercados diferenciados (orgánicos, exportación).

El área sembrada de maca en Pasco no sigue una tendencia de crecimiento sostenido, sino que responde a choques coyunturales del mercado y del clima. La regresión lineal captura un escenario de mediano plazo donde el cultivo se mantendría en superficies limitadas, lo que obliga a pensar en estrategias de valor agregado, certificación orgánica y manejo sostenible de suelos, más que en expansión de áreas, como la vía para garantizar la sostenibilidad del cultivo en la región.

c. Análisis meteorológicos

Tabla 2 - Datos meteorológicos de Cerro de Pasco periodo 2002 – 2024.

Año	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Temperatura promedio	Humedad Relativa (%)	Precipitación (mm)
2002	11.8	0.7	6.3	84.2	1185.0
2003	11.6	0.5	6.1	83.8	1102.4
2004	11.9	0.6	6.3	84.5	1220.7
2005	12.1	0.9	6.5	85.3	1310.2
2006	11.4	0.2	5.8	82.7	1028.9
2007	11.0	1.0	6.0	83.5	978.6
2008	11.7	0.8	6.3	85.1	1403.3
2009	11.3	0.3	5.8	84.0	995.7
2010	11.5	0.4	6.0	83.6	1076.1
2011	11.2	0.2	5.7	84.4	1018.8
2012	11.9	0.6	6.3	85.0	1250.5
2013	11.9	0.9	6.4	85.5	1512.9
2014	11.7	0.5	6.1	84.8	1178.0
2015	11.0	1.0	6.0	83.9	945.4
2016	11.8	0.8	6.3	84.3	1284.6
2017	10.9	0.9	5.9	85.0	1002.2
2018	11.1	0.4	5.7	82.3	1052.6
2019	11.4	0.5	5.9	85.1	2052.6
2020	12.0	0.6	6.3	84.6	1173.8
2021	11.3	0.8	6.0	84.6	1049.4
2022	11.8	-0.1	5.8	83.6	1730.4
2023	12.0	0.6	6.3	79.6	942.6
2024	12.5	1.1	6.8	77.6	1088.3

Fuente: SENAMHI Perú.

La Tabla 2 recoge los principales indicadores climáticos de Cerro de Pasco —temperatura máxima, mínima y promedio, humedad relativa (%) y precipitación anual (mm)— entre 2002 y 2024. El análisis de esta información permite comprender las condiciones ambientales en que se desarrolló el cultivo de maca y establecer su relación con las variaciones productivas registradas en el mismo periodo.

En primer lugar, la temperatura promedio anual se mantuvo en un rango relativamente estable, entre 5.7 °C (2018) y 6.8 °C (2024). Aunque la

variación absoluta es pequeña ($\approx 1.1^\circ\text{C}$), resulta significativa en ecosistemas altoandinos, donde incluso cambios leves pueden impactar la fenología de la maca. Se observa un ligero incremento en los últimos años, destacando 2024 como el año más cálido de la serie (6.8°C), lo que sugiere un efecto del cambio climático en forma de calentamiento gradual.

La temperatura máxima osciló entre 10.9°C (2017) y 12.5°C (2024), mientras que la mínima registró valores cercanos a cero e incluso negativos (-0.1°C en 2022). Estos datos reflejan la amplia oscilación térmica diaria característica de la puna altoandina, con días templados y noches frías, condiciones a las que la maca está adaptada. Sin embargo, episodios de heladas severas (cuando la mínima desciende bajo 0°C) pueden haber afectado el establecimiento del cultivo en campañas críticas, como se infiere de la baja producción de 2014.

En cuanto a la humedad relativa, los valores oscilaron entre 77.6 % (2024) y 85.5 % (2013). La tendencia general muestra una disminución en los años recientes, coincidiendo con la percepción local de un ambiente más seco y variable. Este descenso de humedad puede haber generado condiciones de estrés hídrico, particularmente en fases tempranas de desarrollo del cultivo.

La precipitación anual presenta una variabilidad marcada: desde un mínimo de 942.6 mm en 2023 hasta un máximo excepcional de 2052.6 mm en 2019. Esta alta variabilidad interanual es consistente con la mayor inestabilidad climática reportada en la sierra central, caracterizada por periodos de sequía y lluvias torrenciales. La relación con la producción es compleja: en años de exceso de lluvias (ej. 2019), los suelos pueden saturarse y afectar el crecimiento del hipocótilo, mientras que en años de déficit (ej. 2015, con 945 mm) el estrés hídrico reduce la productividad.

En síntesis, la Tabla 2 muestra que, entre 2002 y 2024, Cerro de Pasco experimentó un clima frío, variable y cada vez más extremo, con un ligero aumento de la temperatura promedio, una reducción progresiva de la humedad relativa y una alta variabilidad en las lluvias anuales. Estas condiciones refuerzan la idea de que la maca, aunque adaptada a ambientes

extremos, enfrenta crecientes desafíos frente al cambio climático, que se traduce en inestabilidad productiva y explica en parte el bajo ajuste del modelo de regresión múltiple ($R^2 = 0.178$).

d. Regresión lineal múltiple

Modelo:

Rendimiento = $26.2962 - 1.1986 \cdot \text{Temp_prom} - 0.1881 \cdot \text{Humedad} + 0.0006 \cdot \text{Precipitacion}$

$R^2 = 0.178 \rightarrow$ El modelo indica que solo el 17.8 % de la variación en el rendimiento de la maca se explica por las variables meteorológicas consideradas (temperatura promedio, humedad relativa y precipitación). Esto revela que el rendimiento está influenciado de manera predominante por otros factores no climáticos, como manejo agronómico, fertilización, rotación de cultivos, calidad del suelo, plagas y, sobre todo, condiciones de mercado.

Ninguna de las tres variables alcanzó un nivel de significancia estadística al 5 % ($p > 0.05$).

La temperatura promedio y la humedad relativa se acercaron al umbral de significancia al 10–12 %, lo que sugiere una influencia parcial que merece más análisis con series más amplias o con modelos no lineales.

La precipitación mostró un efecto positivo pero débil (coeficiente 0.0006), posiblemente debido a la alta variabilidad interanual de lluvias, donde tanto déficit como excesos resultan perjudiciales para el cultivo.

Interpretación de los coeficientes:

Temperatura promedio (-1.1986): el modelo sugiere que un incremento de 1°C en la temperatura promedio anual reduciría el rendimiento en ≈ 1.2 t/ha, lo cual es coherente con la sensibilidad de la maca al estrés térmico y a la reducción de horas frío.

Humedad relativa (-0.1881): un aumento de 1 % en la humedad relativa se asocia con una disminución de 0.19 t/ha, posiblemente porque mayor humedad favorece la proliferación de plagas o enfermedades del follaje y raíz.

Precipitación (0.0006): por cada mm adicional de lluvia, el rendimiento aumentaría en 0.0006 t/ha. Aunque positivo, este efecto es marginal y se diluye frente a los problemas de saturación hídrica y erosión en años de lluvias extremas.

Constante (26.2962, significativa con $p = 0.035$):

La constante elevada indica que, aun en ausencia de los efectos de las tres variables, el modelo predice un rendimiento relativamente alto. Esto refleja una posible sobreestimación del intercepto por la baja capacidad explicativa de las variables incluidas.

Implicaciones agronómicas:

Los resultados muestran que las variables meteorológicas, aunque importantes, no bastan por sí solas para explicar la variabilidad del rendimiento.

Es necesario incluir variables de suelo (pH, materia orgánica, nutrientes), de manejo (uso de fertilizantes, rotación, plagas) y económicas (precios, incentivos de mercado) para mejorar la capacidad predictiva.

e. Prueba de Mann-Kendall para tendencia de largo plazo (2002-2024)

- Rendimiento de maca

$$S = 34;$$

$$Z = 0.872;$$

$$p = 0.383;$$

Tendencia: No significativa.

No hay evidencia estadística de una tendencia creciente o decreciente sostenida en el rendimiento en este periodo.

Área cultivada

$$S = -41;$$

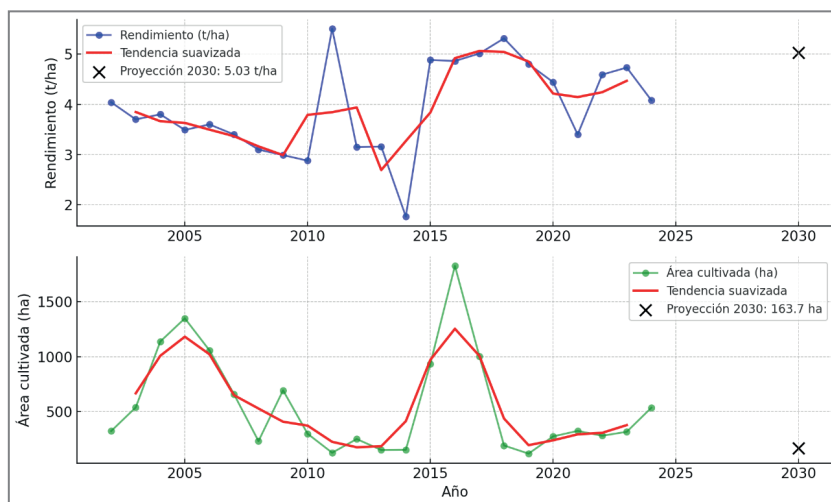
$$Z = -1.056;$$

$$p = 0.291;$$

Tendencia: No significativa.

Tampoco hay evidencia estadística de una tendencia descendente o ascendente de largo plazo en el área sembrada.

Figura 7 - Tendencia suavizada para rendimiento y área cultivada y estimación para el año 2030.



Según la proyección con tendencia suavizada (media móvil + regresión lineal) al año 2030:

Rendimiento estimado: ≈ 5.03 t/ha;

Área cultivada estimada: ≈ 164 ha.

La Figura 7 presenta un análisis de tendencia suavizada (media móvil + regresión lineal) aplicado a los datos históricos de rendimiento (t/ha) y área cultivada (ha) de maca en la región Pasco durante el periodo 2002–2024, con una proyección hacia el año 2030.

En el caso del rendimiento, la curva suavizada revela una evolución caracterizada por fluctuaciones interanuales moderadas, pero con una tendencia general de estabilidad. Aunque en años aislados se alcanzaron valores altos (2011, 2015–2018) y otros muy bajos (2014), el comportamiento

agregado muestra que el cultivo mantiene su productividad dentro de un rango de 3.5 a 5.5 t/ha. La proyección al 2030 estima un rendimiento de aproximadamente 5.03 t/ha, lo que sugiere un escenario de recuperación moderada y relativa estabilidad productiva, siempre que se mantengan condiciones climáticas y de manejo similares a las observadas en el periodo de análisis.

Respecto al área cultivada, la curva suavizada refleja un comportamiento mucho más inestable, con expansiones rápidas y caídas abruptas. El punto más alto se registró en 2016 (1 827 ha), coincidiendo con el auge internacional de la maca. Sin embargo, la rápida contracción posterior demuestra que la superficie sembrada responde principalmente a factores coyunturales de mercado y no a una planificación agronómica de largo plazo. La tendencia suavizada muestra un descenso gradual en la superficie cultivada, proyectando para el 2030 un área aproximada de 164 ha, lo que implica que la maca en Pasco tendería a ocupar espacios más reducidos y selectivos.

El contraste entre ambas curvas es revelador: mientras el rendimiento tiende a estabilizarse, la superficie cultivada muestra una clara tendencia decreciente, lo que indica que la maca probablemente mantendrá niveles productivos relativamente estables, pero en áreas más limitadas. Esto puede deberse a que los agricultores han aprendido a priorizar la calidad y el valor agregado sobre la expansión indiscriminada de áreas, evitando así los riesgos de sobreoferta y degradación del suelo observados en el boom del 2015–2016.

La Figura 6 plantea un escenario hacia el 2030 donde la maca en Pasco seguirá siendo un cultivo de importancia económica y cultural, pero bajo un modelo de producción más focalizado y sostenible, en el cual los rendimientos se mantendrán en un rango aceptable, aunque la superficie cultivada sea significativamente menor que en el pasado.

5 DISCUSIÓN

La regresión múltiple muestra baja explicación ($R^2 = 0.178$), lo cual coincide con literatura que señala la influencia de factores no solo climáticos sino también de manejo agronómico y mercado (Custodio *et al.*, 2021; UNALM, 2025). Resaltar que no hay tendencia significativa en rendimiento o área (Mann-Kendall), lo cual confirma la alta variabilidad interanual observada por MIDAGRI (2016) y estudios previos.

Diversos estudios internacionales han demostrado que *Lepidium meyenii* posee una notable plasticidad fenotípica para adaptarse a condiciones extremas de altitud, temperatura y radiación solar. Gonzales *et al.* (2014) en ensayos realizados en la región andina del Perú y comparados con observaciones en el altiplano boliviano, resaltan que la maca mantiene estabilidad en su rendimiento incluso bajo escenarios de heladas recurrentes, lo que la diferencia de otros cultivos sensibles como la papa o la quinua temprana. De igual modo, investigaciones en China, donde se introdujo la maca a inicios del 2000, evidencian que el rendimiento y calidad de la raíz disminuyen cuando se cultiva por debajo de los 3500 m.s.n.m., confirmando la dependencia de la especie a climas fríos de altura (Zhang *et al.*, 2017).

Al comparar con otros cultivos andinos, la quinua (*Chenopodium quinoa*) ha mostrado resiliencia frente al cambio climático debido a su tolerancia a la sequía y variabilidad térmica (Jacobsen *et al.*, 2013), mientras que la kiwicha (*Amaranthus caudatus*) presenta mayor sensibilidad a lluvias excesivas y variaciones extremas de temperatura. En contraste, la maca responde mejor a suelos fríos y con baja fertilidad, pero su productividad disminuye cuando la temperatura media anual supera los 12 °C, lo que coincide con las tendencias proyectadas de calentamiento global en los Andes (Valdivia *et al.*, 2015).

Estos hallazgos permiten contextualizar que el comportamiento observado en la región Pasco entre 2004 y 2024 se alinea con evidencias globales: la maca es un cultivo estratégico en escenarios de cambio climático

para las zonas altoandinas, pero enfrenta limitaciones de expansión en altitudes medias o bajas. Su comparación con la papa nativa y la quinua demuestra que, aunque todas presentan adaptaciones ancestrales, la maca es más restrictiva en su rango altitudinal, lo cual debe ser considerado en futuros planes de seguridad alimentaria y diversificación agrícola.

La expansión del cultivo de *Lepidium meyenii* en China desde inicios de la década del 2000 representa un fenómeno de gran relevancia para la agricultura altoandina y la economía peruana. Si bien la maca es un cultivo originario y emblemático del Perú, con fuerte arraigo cultural en las comunidades de Junín y Pasco, la introducción del cultivo en regiones como Yunnan y el Tíbet ha generado un proceso de “deslocalización productiva” que plantea riesgos múltiples. Desde el punto de vista agronómico, la maca cultivada en suelos y altitudes chinas ha mostrado adaptabilidad parcial, pero con limitaciones en la concentración de metabolitos secundarios como macamidas y glucosinolatos, los cuales están estrechamente vinculados a las condiciones ecológicas únicas de la puna peruana (Wang *et al.*, 2019). Esto sugiere que, aunque la productividad pueda mantenerse, la calidad funcional y nutricional de la maca fuera de su terruño de origen presenta diferencias notables.

Sin embargo, el principal riesgo para el Perú no radica únicamente en la calidad del producto, sino en la dinámica comercial global. China ha invertido en la domesticación, procesamiento y exportación de maca, posicionándose en mercados internacionales con menores costos de producción y ventajas logísticas. Esta competencia directa afecta a los pequeños productores peruanos, quienes enfrentan mayores costos de cultivo debido a las condiciones adversas de la altura, la limitada mecanización y la dependencia de cadenas de comercialización locales y regionales. El ingreso de maca china al mercado global reduce la competitividad de la maca peruana, presionando los precios a la baja y afectando de manera inmediata los ingresos campesinos.

Adicionalmente, la expansión de la maca en China abre un debate en torno a la biopiratería y los derechos de propiedad intelectual sobre los recursos genéticos andinos. La ausencia de mecanismos internacionales efectivos para proteger cultivos de origen ancestral ha facilitado que material genético de maca sea utilizado fuera del Perú sin acuerdos de

repartición de beneficios, vulnerando los derechos de las comunidades productoras y las disposiciones del Protocolo de Nagoya. Esto no solo representa un riesgo económico, sino también cultural y patrimonial, ya que se diluye el reconocimiento de la maca como producto vinculado a la identidad andina.

Desde una perspectiva socioambiental, la expansión china de la maca puede también inducir cambios en la percepción del consumidor internacional. Si los mercados priorizan el precio sobre el origen, existe el riesgo de que la maca “genérica” desplace a la maca peruana en las cadenas de supermercados y laboratorios nutracéuticos. En ese escenario, la maca de Pasco y Junín quedaría relegada a nichos de mercado especializados (orgánico, denominación de origen, comercio justo), lo cual exige que el Perú fortalezca sus estrategias de diferenciación, certificación y trazabilidad para resguardar su valor agregado.

6 CONCLUSIONES

1. El análisis de series históricas (2002–2024) muestra que tanto el rendimiento como el área cultivada de maca en Pasco no presentan una tendencia estadísticamente significativa en el largo plazo, reflejando la alta variabilidad interanual del cultivo y su dependencia de factores externos, más allá de las condiciones climáticas.
2. Las variables meteorológicas evaluadas (temperatura promedio, humedad relativa y precipitación) explican únicamente el 17,8 % de la variabilidad en el rendimiento, lo cual evidencia que el desempeño productivo de la maca está condicionado principalmente por aspectos de manejo agronómico, disponibilidad de insumos, prácticas de conservación de suelos y dinámicas de mercado.
3. Las proyecciones al año 2030 indican un rendimiento estimado de 5,03 t/ha y un área cultivada de 164 ha, lo que sugiere un escenario de relativa estabilidad con ligera recuperación respecto a los periodos de mayor contracción productiva, siempre que se mantengan prácticas de manejo tradicionales y condiciones de mercado favorables.
4. Los resultados de este estudio confirman la necesidad de ampliar los modelos de análisis incorporando variables edáficas (fertilidad, acidez, contenido de materia orgánica), de manejo (rotaciones, uso de fertilizantes y abonos orgánicos) y socioeconómicas (precios, acceso a mercados, políticas de apoyo), con el fin de mejorar la capacidad predictiva y ofrecer recomendaciones más integrales a los agricultores.
5. La investigación constituye un aporte técnico relevante para el diseño de políticas agrarias en la región Pasco, orientadas a fortalecer la resiliencia climática, la sostenibilidad del cultivo de maca y la competitividad de los productores altoandinos frente a escenarios de variabilidad climática y presión de mercados internacionales.

7 RECOMENDACIONES

1. Es necesario promover un manejo sostenible del cultivo de maca mediante la introducción de rotaciones con gramíneas, leguminosas u otros cultivos andinos que permitan recuperar nutrientes, reducir la presión de plagas y evitar la degradación edáfica causada por el monocultivo continuo. Asimismo, se recomienda aplicar prácticas de conservación como el uso de abonos orgánicos, barreras vivas y terrazas, que contribuyan a mantener la fertilidad y estabilidad de los suelos altoandinos a largo plazo.
2. Las investigaciones sobre la producción de *Lepidium meyenii* no deben limitarse únicamente a variables climáticas. Es fundamental incluir indicadores edáficos como contenido de materia orgánica, pH, disponibilidad de nutrientes (N, P, K, B), salinidad y estructura del suelo, dado que estos factores condicionan la productividad y resiliencia del cultivo. El monitoreo integrado de clima y suelo permitirá generar modelos predictivos más robustos y útiles para la planificación agrícola regional.
3. Ante la creciente competencia internacional, en especial por la expansión del cultivo de maca en China, se recomienda consolidar cadenas de valor diferenciadas que aseguren la calidad y autenticidad de la maca peruana. La implementación de certificaciones de origen, sistemas de trazabilidad y estándares de comercio justo permitirá acceder a mercados de alto valor, proteger a los productores locales y resguardar la identidad cultural del cultivo.
4. Los hallazgos de esta investigación deben integrarse a las políticas agrarias y de desarrollo regional, orientando la formulación de programas de adaptación al cambio climático en zonas altoandinas. Es indispensable que gobiernos regionales, universidades, productores y organizaciones campesinas trabajen de manera conjunta para implementar planes de gestión del riesgo agroclimático, asistencia técnica y transferencia tecnológica que fortalezcan la resiliencia del cultivo de maca y de otros productos andinos estratégicos.

REFERENCIAS

- Agraria.pe. (2016, 3 de noviembre). **Otorgan certificación orgánica a los productores de maca de Junín y Pasco**. <https://agraria.pe/noticias/otorgan-certificacion-organica-a-los-productores-de-maca-de--12493>.
- Aliaga, R. (2004). **Raíces andinas. La maca**. CIP – Papa. Recuperado de https://cipotato.org/wp-content/uploads/2014/06/25_La_maca_edit.pdf.
- Appropedia (2025). **Root Crops/Maca (Lepidium meyenii)**. Recuperado de https://www.appropedia.org/Root_Crops/Maca_%28Lepidium_meyenni%29.
- Bianchi, A. (2003). **Maca (Lepidium meyenii)**. Redalyc (reseña histórica y presencia en Junín–Pasco). <https://www.redalyc.org/pdf/856/85620303.pdf>.
- Buenazo.pe. (2023, marzo 10). **Maca: ¿cómo preparar la bebida?**. Recuperado de <https://buenazo.pe/notas/2022/02/24/maca-propiedades-usos-630>.
- Calderón Rodríguez, A., & Cáceres Cunto, C. (2018). **Producción de maca (Lepidium meyenii Walp.) en condiciones de invernadero**. *Ecología Aplicada*, 17(2). <https://doi.org/10.21704/rea.v17i2.1233>.
- Chacón de Popovici, G. (1990). **Descripción de Lepidium peruvianum y discusión taxonómica con Lepidium meyenii**. *Revista Peruana de Biología*, 3(2), 193–212.
- Chen, L., Li, J., Fan, L. (2017). **The Nutritional Composition of Maca in Hypocotyls (Lepidium meyenii Walp.) Cultivated in Different Regions of China**. *Journal of Food Quality*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3749627>.
- Cobo, B. (1964). **Historia del Nuevo Mundo** (Vol. 2). Biblioteca de Autores Españoles, Ediciones Atlas. (Obra original publicada en 1653). <https://bibliotecadigital.aecid.es/bibliodig/es/consulta/registro.do?id=4397>.
- Collins, D. (2015). **Peru's maca boom could fall flat if China starts growing its own**. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/global-development/2015/feb/09/peru-maca-indigenous-root-china-biopiracy>.
- Custodio, M., Huaraca-Meza, F., Peñaloza, R., Alvarado-Ibañez, J. C., & de la Cruz-Solano, H. (2021). **Composición bacteriana en suelos de cultivo de maca (Lepidium meyenii Walp) analizada mediante metagenómica: un estudio en los Andes centrales del Perú**. *Scientia Agropecuaria*, 12(2), 175–183. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.020>.
- Del Carpio, N. U. (2024). **A comprehensive review of the effects of maca (Lepidium meyenii)**. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10910417/>.
- Exportemos.pe. (2025). **POP Maca – Pasco**. (Boletín). <https://boletines.exportemos.pe/recursos/boletin/27712.PDF>.
- Gattuso, D. T., Polisca, A., Interlandi, C. D., Rizzo, M., Tabbi, M., Giudice, E., ... & Zappone, V. (2024). **Influence of dietary supplementation with Lepidium meyenii (Maca) on sperm quality in dogs**. *Frontiers in Veterinary Science*, 11, 1375146. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1375146>.
- Gómez, D., López, F., & Torres, R. (2019). **Monitoreo y evaluación agronómica de cultivos en condiciones de campo**. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 13(2), 243–253. <https://doi.org/10.17584/rcch.2019v13i2.10313>.

Gonzales, G. F. (2011). **Ethnobiology and ethnopharmacology of *Lepidium meyenii* (maca). Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine.** <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3184420/>.

Gonzales, G. F., Gonzales, C., & Gonzales-Castañeda, C. (2009). ***Lepidium meyenii* (Maca): a plant from the highlands of Peru—from tradition to science.** *Forschende Komplementärmedizin/Research in Complementary Medicine*, 16(6), 373-380. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20090350/>.

Guerra López, M., & Zúñiga Dávila, D. (2018). ***Pseudomonas* sp. LMTK32 production in modified media for pelleting seeds of maca (*Lepidium meyenii* Walp.).** Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Recuperado de <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/rpb/article/view/14034>.

Gül, E. T. (2022). **Use of maca powder (*Lepidium meyenii*) as a feed additive for aging laying quails improves eggshell, ileum, and bone traits.** *Veterinary Sciences*, 9(8), 418. <https://doi.org/10.3390/vetsci9080418>.

Hatfield, J. L., & Walthall, C. L. (2015). **Meeting global food needs: Realizing the potential via genetics x environment x management interactions.** *Agronomy Journal*, 107(4), 1215-1226. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0076>.

Heggarty, P., & Beresford-Jones, D. (2010). **Arqueología, lingüística e historia prehispánica andina.** *Boletín de Arqueología PUCP*, (14), 17-53. <https://doi.org/10.18800/boletindearqueologiapucp.201001.001>.

HerbaZest Editorial Team. (2024, octubre 15). **Maca Recipes – 27 Wholesome & Delicious Ideas.** Recuperado de <https://www.herbazest.com/herbs/maca/recipes>.

Hermann, M., & Bernet, T. (2009). **The transition of maca from neglect to market prominence: Lessons for improving use strategies and market chains of minor crops.** <https://cgspace.cgiar.org/items/d19423ba-fde7-4133-b9b3-5cebc20d2629>.

Huaraca Meza, F. (2016). **Variabilidad genética de maca (*Lepidium meyenii* Walp) de la Meseta de Bombón – Junín, Perú** [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. RENATI. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/2834>.

Huerta-Ojeda, Á., et al. (2024). **Effects of Maca (*Lepidium meyenii* Walp.) on Physical ... Nutrients**, 17(1), 107. <https://doi.org/10.3390/nu17010107>.

INDECOPI. (2024). **Denominación de Origen: Maca Junín-Pasco (2011).** <https://www.gob.pe/institucion/indecopi/informes-publicaciones/5227600-denominacion-de-origen-maca-junin-pasco-2011>.

INEI. (2024, julio). **Informe técnico: Producción nacional – julio 2024** (boletín). <https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/informe-de-produccion.pdf>.

INEI. (2024). **Avance económico departamental: Pasco – series 2001-2024.** https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaless/Est/Lib1966/pasco.htm.

Jagdale, Y. D., Mahale, S. V., Zohra, B., Nayik, G. A., Dar, A. H., Khan, K. A., Abdi, G., & Karabagias, I. K. (2021). **Nutritional Profile and Potential Health Benefits of Super Foods: A Review.** *Sustainability*, 13(16), 9240. <https://doi.org/10.3390/su13169240>.

Janamapa Santome, M. C. (2016). **Desempeño fisiológico de las plantas de *Lepidium meyenii* Walp. en condiciones de bajas temperaturas** [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Cayetano Heredia]. Repositorio Institucional CONCYTEC. <https://repositorio.concytec.gob.pe/handle/20.500.12899/50613>.

Kahrizi D, Far AF, Chaghakaboodi Z, Khazaei M, Sozmen EU, Dogan H. **Stem cell induction and plant regeneration are affected by medium components in maca (*Lepidium meyenii* Walp).** Mol Biol Rep. 2023 May;50(5):4187-4192. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36899280/>.

Li, K., Zhao, C., Dang, M., Ren, R., Fu, M., Bai, Y., Wang, J., Zhang, Q., & Luan, F. (2025). **Global research status of Maca (*Lepidium meyenii* Walp.): A bibliometric analysis of hotspots, bursts, and trends.** Drug Design, Development and Therapy, 19, 2329–2349. <https://doi.org/10.2147/DDDT.S499849>.

Lobell, D. B., Thau, D., Seifert, C., Engle, E., & Little, B. (2020). **Monitoring crop progress and yield with satellite observations and Google Earth Engine.** Remote Sensing of Environment, 242, 111722. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111722>.

López Medina, S. E., Mostacero León, J., Gil Rivero, A. E., López Zavaleta, A., De La Cruz Castillo, A. J., & Villena Zapata, L. (2021). **Desarrollo de la fase reproductiva de *Lepidium meyenii* "maca" en condiciones de Costa, Trujillo, Perú.** Revista Científica Dékamu Agropec, 2(1), 9–14. <https://doi.org/10.55996/dekamuagropec.v2i1.45>.

Mahdy, T. M. M., Abuol-Omran, M. A., Desoky, A. L. I., Omnia, M., Abo-Farw, M. A., El-Kholany, M. M., ... & Khalifa, E. I. (2023). **Effect of add maca powder to the base diet on weaning lambs and rams semen characteristics.** Egyptian Journal of Sheep & Goats Sciences, 19(2). https://journals.ekb.eg/article_330919_06cb14da64065ed21a3eb07eaba75a4a.pdf.

Malthus, T. R. (1998). **An Essay on the Principle of Population.** Amherst, NY: Prometheus Books. <https://doi.org/10.4324/9781315133336>.

Meissner, H. O., et al. (2017). **Peruvian Maca (*Lepidium peruvianum*) – III: The effects of altitude on glucosinolate concentration and related traits.** [Estudio]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5542917/>.

MIDAGRI. (2016). **El Perú es el primer exportador mundial de maca y quinto en uvas frescas** (nota de prensa). <https://www.midagri.gob.pe/portal/noticiasanteriores/notas-2016/15256-el-peru-es-el-primer-exportador-mundial-de-maca-yquinto-en-uvas-frescas>.

MIDAGRI-SIEA. (2024, abril). **El agro en cifras** (ediciones 2024). https://siea.midagri.gob.pe/portal/phocadownload/datos_estadisticas/mensual/Agro/2024/Agro_en_cifras_01_2024.pdf.

Minich, D. M. (2024). **Not All Maca Is Created Equal: A Review of Colors, Composition, and Health Effects.** Nutrients, 16(4), 530. <https://doi.org/10.3390/nu16040530>.

Mulla, D. J. (2013). **Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps.** Biosystems Engineering, 114(4), 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>.

NASA. (2021). **The menu for Mars: designing a deep space food system** (contexto de investigación en nutrición espacial; no documenta uso institucional específico de maca). <https://www.nasa.gov/humans-in-space/the-menu-for-mars-designing-a-deep-space-food-system/>.

OrganicCrops (2016). **Peru maca export grows.** (resumen histórico del aumento de exportaciones). <https://organiccrops.net/en/resources/160427-peru-maca-export-grows-with-44-pct-to-USD-33-million-in-2015.php>

Peres, N. S. L., et al. (2020). **Medicinal effects of Peruvian maca (*Lepidium meyenii*).** Food & Function. <https://doi.org/10.1039/C9FO02732G>.

Perúbiodiverso / IC Volante. (2025). **La cadena de valor de la maca en la Meseta del Bombón** (estudio). <https://core.ac.uk/download/pdf/48017652.pdf>.

Pulgar Vidal, J. (1972/1973). **Geografía del Perú: Las ocho regiones naturales del Perú** (ed. varias). Editorial Universo / Peisa. (obra clásica sobre pisos ecológicos andinos; ediciones: 1972, 1973 y posteriores). https://books.google.com/books/about/Geograf%C3%ADa_del_Per%C3%BA.html?id=mM9xAAAAMAAJ.

Quiroz, R., & Aliaga, R. (1997). **La maca: Cultivo alimenticio y medicinal del Perú**. Boletín de Lima, (109), 57–66. <https://repositorio.cip.org.pe/handle/20.500.14382/3321>.

Ragab, M. A., Hassan, M. A., Shazly, S. A., El-Kholany, M. E., Ahmed, M. E., & El-Raghi, A. A. (2023). **The benefits of Maca (*Lepidium meyenii*) extract administration for male rabbits affected by environmental heat stress**. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 107(1), 286-297. <https://doi.org/10.1111/jpn.13772>.

Ruder S. (2023). Maca Coffee: A Peruvian Recipe with Potential Health [Life Extension.]. Recuperado de <https://www.lifeextension.com/wellness/recipes/maca-coffee>.

Sifuentes-Penagos, G., León-Vásquez, S., & Paucar-Menacho, L. M. (2015). **Estudio de la maca (*Lepidium meyenii* Walp.), cultivo andino con propiedades terapéuticas**. Scientia Agropecuaria, 6(2), 1–15. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2015.02.06>.

Solórzano-Acosta, R., Chanco, M., Seminario, M., Cabello-Torres, R., Camel, V., Lastra, S., Arias, A., Verástegui, P., Quispe, K., Carbajal-Llosa, C., Cuevas, J. P., Cruz, J., & Turín, C. (2025). **Soil management in *Lepidium meyenii* (maca) monoculture: trends and challenges for small farmers around Lake Chinchaycocha in the Andean highlands of Junin (Peru)**. Frontiers in Soil Science, 4:1419745. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1419745>.

Tejada-Purizaca, T. R., et al. (2024). **Heavy metal bioaccumulation in Peruvian food and implications**. [Artículo]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10931273/>.

Tridge. (2024). Peru — **Maca market overview** (precios y exportaciones). <https://www.tridge.com/intelligences/maca/PE>.

Turgud, F. K., & Nariñç, D. (2022). **Influences of dietary supplementation with Maca (*Lepidium meyenii*) on performance, parameters of growth curve and carcass characteristics in Japanese quail**. Animals, 12(3), 318. <https://doi.org/10.3390/ani12030318>.

Universidad Nacional Agraria La Molina (2025). **La maca (*Lepidium meyenii*)**. Recuperado de <https://www.lamolina.edu.pe/investigacion/programa/maca/>.

Universidad Nacional Agraria La Molina. (2025). **Manual del cultivo de la maca**. https://proyeccion.lamolina.edu.pe/manuales/Manual_Cultivo_Maca.pdf.

Velásquez-Barreto, F. F., et al. (2021). **Relationships among molecular, physicochemical and functional properties of Andean tuber starches. Food Hydrocolloids**. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813021007947>.

Villaorduña-Caldas, L. F., Zevallos-Arias, E. L., Alvaréz-Rodríguez, F. J., & Viza-Pucllas, I. (2020). **Análisis de segregación, obtención de semilla de maca (*Lepidium meyenii*) en segunda selección y producción en dos altitudes**. Agroindustrial Science, 10(2), 137–143. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.02.03>.

Wang, S., & Zhu, F. (2019). **Chemical composition and health effects of maca (*Lepidium meyenii*)**. Food chemistry, 288, 422–443. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.071>.

World Bank. (2017). **Gaining momentum in Peruvian agriculture: opportunities to increase productivity and enhance competitiveness** (documentos sobre cadenas de valor y apoyo a productores). <https://documents1.worldbank.org/curated/en/275111518463714554/txt/Gaining-momentum-in-Peruvian-agriculture-opportunities-to-increase-productivity-and-enhance-competitiveness.txt>.

Zaytseva, O., Terrel Gutierrez, M., & Graeff-Hönninger, S. (2022). **Effect of day length on growth and root morphology of yellow maca (*Lepidium meyenii*) seedlings**. *International Journal of Plant Biology*, 13(2), 71-81. <https://www.mdpi.com/2037-0164/13/2/8>.

Zhang, J., et al. (2018). **MGH: a genome hub for the medicinal plant maca (*Lepidium meyenii*)**. Database. doi:10.1093/database/bay113. (Acceso: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30339215/>).

Zhang, J., Tian, Y., Yan, L., Zhang, G., Wang, X., Zeng, Y., Zhang, J., Ma, X., Tan, Y., Long, N., Wang, Y., Ma, Y., He, Y., Xue, Y., Hao, S., Yang, S., Wang, W., Zhang, L., Dong, Y., Chen, W., & Sheng, J. (2016). **Genome of plant maca (*Lepidium meyenii*) illuminates genomic basis for high-altitude adaptation in the Central Andes**. *Molecular Plant*, 9(7), 1066–1077. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2016.04.016>.

Zhang, J., Wang, H. M., Zhao, Y. L., Zuo, Z. T., Wang, Y. Z., & Jin, H. (2015). **Comparison of mineral element content in a functional food Maca (*Lepidium meyenii* Walp.) from Asia and South America**. *Journal of analytical methods in chemistry*, 2015 (1), 530541. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26236540/>.

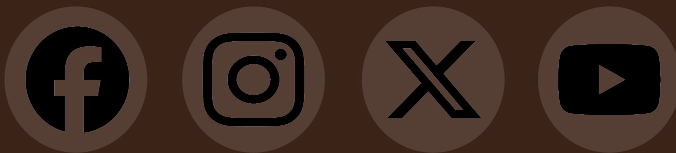
40 Aprons. (2024, octubre 24). **Miracle Maca Latte Recipe (Maca powder, Vegan, Paleo)**. Recuperado de <https://40aprons.com/miracle-maca-latte-recipe-powder-2/>.



científica digital



VENDA PROIBIDA - ACESSO LIVRE - OPEN ACCESS



www.cientificadigital.org | contato@cientificadigital.org