IDEOs
Centro de Investigación
y Producción Científica

Fertilización y rendimiento del *frijol común*

Evaluación de dosis NPK y respuesta productiva en condiciones agroecológicas de la región *Huánuco*



Benancio Pantoja Medina
Iris Sánchez Baldeón
Nancy Noema Rojas Leandro
Rodrigo Ponce Escobal
Rojas Flores Vanesa Yessica

Fertilización y rendimiento del frijol común

Evaluación de dosis NPK y respuesta productiva en condiciones agroecológicas de la región Huánuco

Editor

IDEOs
Centro de Investigación
y Producción Científica

Benancio Pantoja Medina

bpantojam@undac.edu.pe
https://orcid.org/0000-0003-4616-4302
Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Pasco - Perú

Iris Sánchez Baldeón

isanchezb@undac.edu.pe
https://orcid.org/0009-0008-4010-1128
Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Pasco - Perú

Nancy Noema Rojas Leandro

nrojasl@undac.edu.pe
https://orcid.org/0009-0008-9121-9409
Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Pasco - Perú

Rodrigo Ponce Escobal

rponcee@undac.edu.pe
https://orcid.org/0009-0007-0178-9575
Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Pasco - Perú

Rojas Flores Vanesa Yessica

vrojasf@undac.edu.pe
https://orcid.org/0009-0004-9549-381X
Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Pasco - Perú

PRÓLOGO

La productividad agrícola no es la simple suma de semillas y fertilizantes. Surge de una negociación biológica permanente entre la planta, la fertilidad del suelo, el agua disponible, el clima y las decisiones de quien cultiva. Esa negociación es especialmente visible en el frijol común, especie que reúne un valor alimentario indiscutible con una capacidad singular de establecer asociaciones simbióticas para obtener nitrógeno. Comprenderla exige combinar la fisiología vegetal, la química del suelo, la experimentación y la economía de la producción; ninguna de estas perspectivas, por sí sola, puede explicar adecuadamente el comportamiento de un cultivo en un territorio concreto.

Las zonas altoandinas y de transición ecológica ofrecen un laboratorio natural de diversidad agronómica. En distancias relativamente cortas cambian la altitud, el régimen hídrico, la composición del suelo y las posibilidades de acceso al mercado. Un productor puede enfrentar un suelo con reservas de ciertos elementos pero con disponibilidad limitada de otros; otro puede contar con nutrientes suficientes y, sin embargo, perder rendimiento por un episodio de déficit hídrico durante la floración. Las recomendaciones universales resultan insuficientes precisamente porque la respuesta agronómica depende de los mecanismos y restricciones específicos que operan en cada sitio.

El valor de los ensayos locales consiste en producir evidencia situada. Frente a consejos transmitidos por costumbre o a programas de fertilización copiados de regiones diferentes, la investigación de campo introduce comparación, replicación y control relativo de la variabilidad. Al mismo tiempo, una buena lectura científica reconoce el límite de esa evidencia: un experimento permite describir el efecto de los tratamientos ensayados en las condiciones en que se evaluaron, pero no demuestra automáticamente que la misma respuesta se repetirá en todos los años, variedades y parcelas de una región. Esta doble exigencia —aprovechar el conocimiento empírico y respetar sus límites— atraviesa toda la obra.

La incorporación de literatura reciente amplía la conversación abierta por las observaciones de Cajabamba. Las investigaciones sobre fósforo y déficit hídrico, arquitectura radical, fijación biológica de nitrógeno y nutrición integrada muestran que la respuesta a los fertilizantes no puede reducirse a una carrera por aplicar dosis mayores. Smith et al. (2022) examinan los efectos conjuntos del agua y el fósforo; Chen et al. (2023) destacan la

plasticidad radical como vía de adquisición de nutrientes; y Coelho et al. (2024) demuestran que la dinámica de absorción depende tanto del cultivar como del ambiente de la campaña. Estos resultados no sustituyen las mediciones locales: contribuyen a interpretarlas con preguntas más precisas.

Un libro científico también debe ser útil más allá del círculo estrictamente académico. Para el profesional de agronomía, proporciona criterios para diseñar un diagnóstico y evaluar resultados; para el docente, organiza mecanismos y debates que pueden discutirse críticamente; para estudiantes e investigadores, distingue el dato, la inferencia y la hipótesis; para gestores de asistencia técnica, recuerda que una recomendación exige comprobación agronómica y evaluación económica. La meta no es imponer un único paquete tecnológico, sino mejorar la calidad de las decisiones que determinan cómo, cuándo y por qué aportar nutrientes al cultivo.

La ciencia aplicada gana relevancia cuando mantiene abierta la posibilidad de revisión. Allí donde un resultado publicado y una tabla de origen no concuerdan, la respuesta correcta no es ocultar la diferencia ni elegir arbitrariamente la cifra que parezca más conveniente. Es documentar la discrepancia, conservar el dato verificable, examinar su consecuencia interpretativa y señalar qué observación adicional permitiría resolverla. Esta actitud de transparencia pertenece al núcleo de la investigación responsable y resulta esencial para que los conocimientos agrícolas circulen con credibilidad entre laboratorios, editoriales y campos de producción.

PRESENTACIÓN

Esta obra procede del documento académico titulado exactamente «LA FERTILIZACION INORGANICA Y EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE FRIJOL (Phaseolus vulgaris L.) VARIEDAD CAPSULA EN CONDICIONES AGROECOLÓGICAS HUACRACHUCO HUÁNUCO», cuya portada identifica a Benancio Pantoja Medina, Iris Sánchez Baldeón, Nancy Noema Rojas Leandro, Rodrigo Ponce Escobal y Vanesa Yessica Rojas Flores, vincula el material con la Universidad Nacional Hermilio Valdizán de Huánuco, Facultad de Ciencias Agrarias y Escuela Académico Profesional de Agronomía, y consigna Huánuco, Perú, 2026 (Pantoja Medina et al., 2026a). En el archivo facilitado no se identifica de manera inequívoca el grado académico para el cual habría sido presentado este texto ni se ofrece un identificador de repositorio o un enlace persistente a esta versión. Por esta razón se cita con precisión como manuscrito académico proporcionado, sin completar metadatos por conjetura.

Existe también una publicación relacionada, verificable e identificada en la revista Alfa: «Fertilización inorgánica y rendimiento de frijol (Phaseolus vulgaris L.) variedad capsula en Cajabamba, Huacrachuco», publicada el 14 de mayo de 2026, con DOI https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i29.470 (Pantoja Medina et al., 2026b). Su lista de autores no coincide íntegramente con la del archivo recibido. La versión editorial se reconoce como obra distinta y se cita por separado. Esta distinción impide atribuir indebidamente al manuscrito suministrado metadatos o responsabilidades autorales correspondientes a la publicación periódica. Asimismo, el documento hace referencia a una pregunta de investigación situada en 2010; ello no permite fijar sin comprobación adicional el año exacto del trabajo de campo.

La transformación editorial propuesta modifica el objeto de lectura. Mientras el escrito de origen organiza antecedentes, materiales, métodos, resultados y conclusiones en una secuencia convencional, este libro desarrolla un argumento científico más amplio: las respuestas de un cultivo leguminoso al aporte de nutrientes deben interpretarse a la luz de la fisiología vegetal, la biología del suelo, la variación ambiental y la economía del productor. Así, el experimento de Cajabamba se incorpora como caso de estudio preciso y verificable, pero deja de ser el único hilo conductor. El lector encuentra, además, herramientas

conceptuales para pensar otros escenarios y delimitar adecuadamente qué aspectos pueden transferirse.

La investigación de origen evaluó cuatro condiciones de fertilización —un testigo y tres paquetes N-P-K— distribuidas en cuatro bloques, con 16 unidades experimentales. Su base empírica comprende 2 496 plantas instaladas, una muestra de 480 plantas procedentes de las áreas netas experimentales y observaciones de vainas por planta, granos por vaina, peso de 100 granos, masa por área neta y rendimiento por hectárea (Pantoja Medina et al., 2026a). Esos números se conservan fielmente. Se presentan tablas de trazabilidad y gráficos nuevos derivados de datos disponibles; cuando se introducen operaciones aritméticas descriptivas, se identifican como elaboración de la obra y no como resultados experimentales adicionales.

Los cuatro primeros capítulos construyen el marco interpretativo necesario. El primero examina la importancia biológica, alimentaria y territorial del frijol común; el segundo, la absorción de nutrientes, la relación entre nitrógeno y simbiosis y las funciones diferenciadas del fósforo y del potasio; el tercero aborda propiedades edáficas, agua, fuentes de fertilización y decisiones de manejo; el cuarto desarrolla indicadores de rendimiento, lógica experimental, inferencia estadística y criterios económicos. El quinto analiza el ensayo en Cajabamba y el sexto contrasta sus hallazgos con investigaciones y enfoques actuales, señalando posibilidades, límites y rutas para futuros ensayos.

La bibliografía original funciona como antecedente histórico y se recupera únicamente cuando es pertinente y suficientemente identificable. A ella se suman investigaciones de revistas científicas, documentos del Instituto Nacional de Innovación Agraria y publicaciones internacionales verificables. La evidencia reunida por Karavidas et al. (2022), Kassa y Kifle (2023), Chen et al. (2023), Gatabazi et al. (2024) y otras contribuciones recientes permite desplazar la discusión desde la cantidad de fertilizante hacia la calidad del diagnóstico. También se incluyen aspectos de alimentación, calidad del grano y sostenibilidad, porque el desempeño de una especie comestible no se agota en el peso cosechado.

El público destinatario incluye agrónomos, investigadores de suelos y cultivos, profesionales de extensión rural, docentes, estudiantes de ciencias agrarias y responsables de programas de desarrollo productivo. Los productores interesados en evaluar alternativas

pueden utilizar las matrices de decisiones como guía de conversación con asistencia técnica, nunca como recetas que reemplacen un análisis local. En ningún momento se afirma que las dosis de Cajabamba sean universalmente óptimas ni que la información disponible establezca rentabilidad económica; ambas conclusiones excederían lo que fue medido.

Se ha preferido una escritura de libro: exposición interpretativa, transiciones entre problemas científicos, comparación de evidencias y reflexiones sobre la práctica. Las tablas y figuras cumplen funciones de síntesis o trazabilidad. Cuando un dato original exige cautela por inconsistencias internas, la discrepancia se declara y se muestra; no se falsifican mediciones ni se fabrican observaciones ausentes. En este sentido, el libro aspira a ser una contribución científicamente autónoma y al mismo tiempo auditable respecto de su investigación de partida.

INTRODUCCIÓN

La producción de frijol común se sitúa en la intersección de tres retos contemporáneos: suministrar alimentos de calidad, mantener la productividad con recursos limitados y disminuir el deterioro de los agroecosistemas. Las leguminosas de grano pueden aportar proteínas, fibra y micronutrientes a la alimentación, mientras que su incorporación a sistemas agrícolas diversificados abre posibilidades para mejorar los ciclos biogeoquímicos. Sin embargo, su capacidad de fijación de nitrógeno atmosférico no las vuelve independientes de la fertilidad del suelo. El establecimiento de raíces y nódulos, la formación de flores y vainas y el llenado de grano requieren nutrientes disponibles y condiciones hídricas adecuadas. La revisión de Karavidas et al. (2022) ofrece un panorama de prácticas agronómicas con influencia sobre rendimiento y calidad, mientras que Nchanji y Ageyo (2021) examinan la dimensión de salud asociada al consumo del frijol.

La palabra fertilización suele ocultar un problema más complejo. Aportar una cantidad determinada de urea, superfosfato o cloruro de potasio no garantiza que ese nutriente ingrese a la planta, llegue al órgano que lo requiere o mejore proporcionalmente la cosecha. La disponibilidad depende de procesos químicos y biológicos del suelo, de la zona de exploración radical, de la humedad, de la temperatura y del equilibrio con otros elementos. Una recomendación expresada como dosis única carece de sentido si no se especifican las condiciones de respuesta; tampoco basta observar un aumento del rendimiento para atribuirlo de manera aislada a uno de los nutrientes cuando todos se modificaron simultáneamente.

En un sistema andino, la heterogeneidad espacial añade dificultad. Una parcela puede encontrarse sobre suelos transportados, con texturas mixtas y pendientes moderadas; otra puede presentar mayor profundidad efectiva o almacenamiento de humedad. La distancia entre surcos, la calidad de semilla, el método de riego, la etapa de aplicación y la presión sanitaria interactúan con el fertilizante. Los ensayos de campo, cuando están diseñados y documentados correctamente, permiten comparar alternativas bajo un conjunto de condiciones, pero su alcance resulta local mientras no se repita el experimento entre ambientes y campañas.

El estudio de Cajabamba proporciona una oportunidad particularmente instructiva. La variedad Cápsula recibió tres combinaciones crecientes de N-P-K frente a un testigo y se

evaluaron cinco indicadores productivos. Los tres tratamientos fertilizados superaron al testigo en rendimiento, pero la comparación de Duncan los ubicó en un mismo grupo estadístico para esta variable al 5 % de significación. La media más alta correspondió a T2, con 4 687,5 kg/ha, sin que ello permita declarar superioridad estadística sobre T1 y T3. Este matiz modifica profundamente la pregunta práctica: no basta con identificar la barra más alta de un gráfico; interesa estimar si la diferencia es distinguible del ruido experimental y si su costo adicional produce una ventaja económica.

La investigación científica publicada durante los últimos años ha añadido dimensiones decisivas. Smith et al. (2022) examinaron la exposición conjunta al déficit de agua y a la baja disponibilidad de fósforo; Chen et al. (2023) revisaron ajustes del crecimiento radical frente a la carencia de fosfato; Coelho et al. (2024) observaron que la dinámica de absorción de macronutrientes varía con la intensidad del déficit hídrico, el hábito de crecimiento y el año agrícola. Los estudios de inoculación de Gatabazi et al. (2024) y Reis et al. (2023) llaman la atención sobre la asociación entre nutrición mineral y microbiología de la rizosfera. Esta evidencia obliga a pensar en sistemas, no en una explicación basada exclusivamente en tres números de fertilización.

El libro adopta el enfoque de una agronomía de mecanismos y decisiones. El primer nivel es biológico: qué necesita la planta, cómo accede a nutrientes y de qué manera se relacionan esos recursos con órganos de cosecha. El segundo es ambiental: qué características del suelo, agua y clima favorecen o restringen el proceso. El tercero es experimental: qué permite afirmar un diseño de bloques, qué diferencias se registraron y qué parte del resultado corresponde a una interpretación. El cuarto es práctico: cómo convertir evidencia situada en hipótesis para asistencia técnica, ensayos adaptativos, planes de monitoreo y evaluaciones económicas que aún deben realizarse.

Al discutir los datos, se preservará el lenguaje de incertidumbre. El manuscrito de origen presenta, por ejemplo, un desajuste entre el promedio de granos por vaina atribuido a T2 en el resumen y el valor que figura en las tablas desagregadas; y una diferencia entre cierta masa por área neta y su correspondiente registro en rendimiento por hectárea. La trazabilidad exige conservar las series informadas y explicar que esos puntos necesitan verificación documental. Estas observaciones no anulan por sí solas el interés del

experimento; muestran por qué la precisión editorial es parte del trabajo científico y no un trámite posterior.

La relevancia social de esta discusión es concreta. El productor no compra significación estadística: compra semillas, fertilizantes, combustible, agua y trabajo; enfrenta riesgo de precios y clima, y vende un grano cuya calidad afecta la comercialización. Por ello, el máximo rendimiento agronómico de un tratamiento no es idéntico al mayor margen neto. Kassa y Kifle (2023) incluyeron explícitamente un análisis económico al calibrar mezclas de fertilización para frijol en un entorno distinto, lo que ilustra una dimensión ausente en el ensayo de Cajabamba. La FAO (2024) recuerda, desde la perspectiva de los sistemas agroalimentarios, que los costos y beneficios ambientales y sociales también importan cuando se evalúan cambios productivos.

Las páginas que siguen recorren seis movimientos intelectuales. Primero, se sitúa al frijol como recurso agrícola y alimentario. Luego se exploran la nutrición mineral, la fijación simbiótica y las interacciones que determinan el aprovechamiento de los insumos. En el centro se analiza el manejo integrado de suelo y agua; a continuación se explican los límites y posibilidades de la evidencia experimental. Solo entonces se presenta el caso de Cajabamba con sus tablas y resultados, antes de discutir lo que puede aprenderse para la producción sostenible. La dirección del razonamiento es deliberada: desde los sistemas y mecanismos hacia la evidencia local, y desde ella de regreso a las decisiones de investigación y manejo.

Contenido

PRÓLOGO....1
PRESENTACIÓN....5
INTRODUCCIÓN....8
CAPÍTULO I....13
1.1. Una especie alimentaria con diversidad agronómica....13
1.2. La cosecha como expresión de procesos biológicos encadenados....15
1.3. El frijol en los territorios de montaña y transición ecológica....16
1.4. Importancia alimentaria y calidad del grano....18
1.5. Desde el potencial genético hasta una producción verificable....19
CAPÍTULO II....31
2.1. Una lectura funcional de los elementos esenciales....31
2.2. Nitrógeno mineral y fijación biológica....32
2.3. El fósforo entre la química del suelo y la arquitectura radical....34
2.4. Potasio, balance de agua y llenado de grano....35
2.5. Interacciones, micronutrientes y fronteras del diagnóstico....37
CAPÍTULO III....49
3.1. El suelo como regulador de disponibilidad y respuesta....49
3.2. Diagnóstico integrado de agua y clima....50
3.3. Fuentes de fertilización, formulación y momento de aplicación....52
3.4. La salud del cultivo y el manejo integrado....54
3.5. Del diagnóstico al protocolo y del protocolo al aprendizaje....55
CAPÍTULO IV....67
4.1. El rendimiento y sus unidades de observación....67
4.2. Bloques completos y control de heterogeneidad....68
4.3. Comparar medias y comprender el significado de significación....70
4.4. Dosis conjunta, función de respuesta y problemas de identificación....71
4.5. De la diferencia productiva a la decisión económica....72
CAPÍTULO V....83
5.1. Territorio, parcela y criterios de observación....83
5.2. Organización de los tratamientos y procedimientos de campo....84
5.3. Componentes reproductivos y masa individual del grano....86
5.4. Producción por área neta y rendimiento por hectárea....89

5.5. Lectura estadística, trazabilidad y límites del experimento 91
CAPÍTULO VI 102
6.1. Interpretar una respuesta positiva sin confundir mecanismos.....102
6.2. Fijación simbiótica y fósforo como agenda de intensificación sostenible.....104
6.3. Agua, clima y respuesta de nutrientes en escenarios variables.....106
6.4. Calidad del grano, costos y transferencia al productor 107
6.5. Agenda de investigación, ética de datos y estrategia territorial.....109
REFLEXIONES FINALES 121
BIBLIOGRAFÍA 123

CAPÍTULO I

EL FRIJOL COMÚN Y SUS TERRITORIOS DE PRODUCCIÓN

La productividad de una leguminosa no puede comprenderse al margen de su historia evolutiva, de la diversidad cultivada y de la función que cumple en la alimentación. El frijol común integra sistemas productivos muy diferentes, desde pequeñas parcelas de montaña hasta explotaciones comerciales especializadas. Esa diversidad significa que los resultados agronómicos se expresan siempre dentro de un contexto de material genético, ambiente y manejo. Antes de discutir dosis y fuentes de nutrientes conviene establecer qué planta se cultiva, qué órganos determinan su cosecha y qué restricciones estructuran las decisiones de producción.

1.1. Una especie alimentaria con diversidad agronómica

El nombre científico Phaseolus vulgaris L. designa una especie domesticada en América cuyo acervo genético conserva adaptaciones diferenciadas. Su cultivo no corresponde a una sola morfología ni a un patrón uniforme de desarrollo. Hay materiales de crecimiento determinado, otros con expansión vegetativa prolongada y formas trepadoras asociadas tradicionalmente a sistemas de policultivo. Broughton et al. (2003) documentaron la relevancia de las especies del género Phaseolus como leguminosas alimentarias y modelos de investigación. La diversidad de hábito de crecimiento explica, en parte, por qué un calendario de labores, una densidad o una comparación de rendimientos no puede separarse del cultivar efectivamente sembrado.

La variedad Cápsula, identificada en el manuscrito de origen, constituye el material sobre el que se obtuvieron los resultados de Cajabamba. El documento no aporta una caracterización genética completa ni describe su estabilidad en diferentes ambientes; por consiguiente, sería improcedente tratarla como equivalente a todo el frijol común. El interés editorial consiste en insertar sus datos dentro de un marco más amplio sin atribuir características varietales no verificadas. Los mecanismos fisiológicos generales de la especie

ayudan a proponer explicaciones, pero cada afirmación sobre la variedad estudiada debe permanecer vinculada a lo que fue efectivamente observado (Pantoja Medina et al., 2026a).

Beebe et al. (2013) examinaron estrategias de fenotipado del frijol frente a la sequía, mientras Porch et al. (2013) estudiaron el aprovechamiento de parientes silvestres y especies relacionadas para la adaptación al cambio climático. Ambos trabajos respaldan la necesidad de tratar la variación genética y la adaptación como componentes centrales de la producción, no como factores secundarios a la fertilización. La elección de un material mejorado debería considerar la estabilidad del cultivo y su compatibilidad con el sistema real de manejo.

En una planta de frijol, las hojas capturan energía, los tallos organizan el transporte, las raíces exploran el suelo y las vainas constituyen el espacio reproductivo donde se alojan las semillas. Es una arquitectura funcional, no una lista aislada de órganos. La formación de una vaina resulta de una secuencia que comprende iniciación floral, fecundación, cuajado y desarrollo; el rendimiento cosechado depende de cuántas de estas oportunidades se completan, de cuántos granos permanecen en cada fruto y de cuánto pesa la materia acumulada en ellos. El manejo nutricional interviene en esa secuencia, aunque difícilmente sea su único factor determinante.

El crecimiento determinado y el indeterminado pueden diferir en el tiempo de solapamiento entre crecimiento vegetativo y reproducción. Esta diferencia modifica la distribución de recursos entre hojas nuevas, raíces, flores y granos, de manera que una dosis eficaz en un material de ciclo relativamente concentrado podría no tener el mismo valor operativo en una variedad trepadora o de duración más prolongada. La fisiología del rendimiento obliga a expresar cualquier recomendación con referencia al genotipo, al momento de aplicación y a las condiciones del cultivo. La generalización sin esta información suele borrar precisamente los mecanismos que explican los resultados.

Las raíces merecen especial atención por su doble función. Participan en la adquisición de agua y minerales, pero también pueden establecer nódulos en asociación con bacterias compatibles. La simbiosis transforma la discusión sobre fertilización nitrogenada: no se trata solo de cuánto nitrógeno está presente en el suelo, sino de cuánta energía dispone la planta para sostener al microorganismo y de qué tan efectivo resulta el intercambio biológico. Graham y Vance (2003) describen oportunidades y restricciones del uso de

leguminosas; en un sistema productivo, estas restricciones incluyen limitaciones del suelo, de la cepa simbionte y del ambiente.

Tabla 1. Dimensiones del cultivo de frijol para un diagnóstico productivo

Dimensión	Qué debe observarse	Por qué importa
Material genético	Cultivar, origen y germinación	Modula fenología y respuesta a insumos.
Establecimiento	Emergencia, densidad, uniformidad	Determina el potencial de plantas cosechables.
Ambiente	Temperatura, humedad, suelo	Condiciona absorción y fijación biológica.
Manejo	Fertilización, riego, sanidad	Define la realización del potencial genético.
Mercado	Calidad comercial, precio y costos	Permite distinguir rendimiento de rentabilidad.

Fuente: Elaboración editorial propia, sustentada en las fuentes científicas citadas en los apartados correspondientes; categorías analíticas, no mediciones de campo.

1.2. La cosecha como expresión de procesos biológicos encadenados

El rendimiento de grano puede descomponerse analíticamente en componentes: número de plantas efectivamente cosechadas, producción de vainas, número de semillas y masa individual del grano. Esta descomposición permite formular preguntas más precisas que «¿cuánto produjo la parcela?». Si disminuye el número de vainas pero aumenta el peso medio de la semilla, una parte de la respuesta final podría estar compensada. Si la planta forma numerosas flores y retiene pocas vainas, la limitación tal vez haya ocurrido antes del llenado. No obstante, los componentes presentan interacciones y no constituyen piezas independientes; por ello deben analizarse junto con el estado del cultivo y no como causas automáticamente demostradas.

Una vaina representa la culminación exitosa de una estructura reproductiva y, al mismo tiempo, una demanda de asimilados. La disponibilidad mineral puede favorecer el crecimiento vegetativo inicial y crear capacidad fotosintética, pero esta capacidad necesita coincidir con el establecimiento y el desarrollo reproductivo. Una nutrición insuficiente puede restringir el número de estructuras disponibles; una oferta de nitrógeno que estimule en exceso el desarrollo foliar puede modificar el reparto de recursos. El significado de un incremento en vainas por planta depende del número final de plantas, de la distribución de la madurez y de la posibilidad de cosechar las vainas formadas.

El número de granos por vaina presenta una lógica distinta. Una vez establecida la estructura reproductiva, la fecundación, el desarrollo temprano y la supervivencia de embriones dependen de la fisiología local y de factores externos. Una parcela que registra un valor alto de vainas no necesariamente alcanza el máximo de granos por cada una. Esta divergencia se observa precisamente en los cuadros originales de Cajabamba: T2 presenta el promedio mayor de vainas, mientras que T1 registra el máximo tabulado de granos por vaina. La lectura correcta no convierte esa diferencia en mecanismo causal probado, pero invita a no reducir la productividad a un único indicador (Pantoja Medina et al., 2026a).

La masa de cien granos es una manera práctica de aproximar el tamaño y el llenado de la semilla. Su variación puede deberse a diferencias genéticas, nutricionales o ambientales, y requiere métodos homogéneos de pesaje para que las comparaciones sean interpretables. En el estudio de referencia este indicador se expresó en gramos, y la media más elevada correspondió a T2. La masa de grano es central para el rendimiento comercial, pero no equivale por sí sola a calidad nutricional, germinación, tiempo de cocción ni preferencia de mercado. Las decisiones de mejoramiento y producción pueden necesitar indicadores adicionales según el destino de la cosecha.

Desde una perspectiva mecanística, el rendimiento final es el resultado de un flujo de materia y energía sujeto a limitaciones sucesivas. Cada etapa del ciclo puede dejar una señal irreversible. Una deficiencia corregida tardíamente no siempre recupera vainas que no llegaron a formarse, del mismo modo que un riego abundante al final no reconstituye por completo hojas dañadas durante una sequía crítica. La fertilización debe evaluarse por su congruencia con la fenología y con las condiciones que permiten que los nutrientes sean utilizados. Esa congruencia, más que el volumen aplicado de manera aislada, constituye un criterio para el manejo eficiente.

1.3. El frijol en los territorios de montaña y transición ecológica

La agricultura de Huánuco reúne espacios de sierra, valle y transición hacia la selva. La altitud, la topografía y la estacionalidad climática influyen en la temperatura del suelo, la erosión, el acceso al agua y las opciones de manejo. La localidad de Cajabamba, distrito de Huacrachuco, provincia de Marañón, constituye el escenario del caso analizado. El manuscrito consigna una altitud de 2 265 metros sobre el nivel del mar y clasifica el entorno

como bosque seco Montano Bajo Tropical; estos detalles pertenecen a la descripción local del ensayo y no autorizan a suponer que toda la provincia comparte idénticas condiciones (Pantoja Medina et al., 2026a).

En paisajes de montaña, el suelo suele presentar contrastes significativos a distancias pequeñas. Un horizonte de textura franca puede coexistir con sectores de mayor contenido de arcilla, depósitos aluviales o zonas donde la escorrentía ha reducido la capa superficial. Tales diferencias alteran la exploración radical, la retención de humedad y el movimiento de nutrientes. La presencia de una pendiente moderada no basta para establecer niveles de erosión ni recomendar automáticamente una enmienda, pero advierte que la conservación de la estructura y la cobertura del suelo debe formar parte del razonamiento agronómico. El diagnóstico situado convierte la heterogeneidad en una condición que se investiga, no en un obstáculo que se ignora.

La pequeña agricultura afronta restricciones que no figuran necesariamente en las ecuaciones de rendimiento. El tamaño y la fragmentación de la propiedad, la oportunidad del financiamiento, la disponibilidad de mano de obra y el acceso a asistencia técnica condicionan qué prácticas se consideran factibles. Una tecnología que exige aplicaciones exactas en una fecha determinada puede ser difícil de ejecutar si el productor carece de transporte o insumos durante esa semana. La calidad científica de una recomendación no se mide solo por la producción biológica que consigue bajo condiciones controladas; también importa su posibilidad de adopción sin generar vulnerabilidades económicas innecesarias.

La estacionalidad convierte el calendario en un elemento técnico. Cuando la disponibilidad de lluvia fluctúa entre semanas o el riego depende de turnos, la aplicación del fertilizante debe coordinarse con las oportunidades reales de disolución y transporte hacia la zona radical. Esto tiene especial relevancia para los nutrientes de movilidad y disponibilidad distintas. Los programas de siembra, manejo de surcos, control de malezas y cosecha no funcionan como operaciones independientes: modifican la probabilidad de que el fertilizante llegue a la planta en un momento útil. Un plan correcto sobre el papel puede ser agronómicamente ineficiente si falla la secuencia de ejecución.

La extensión agrícola necesita, por esta razón, trabajar con parcelas de referencia, registros del productor y escenarios comparables. Una recomendación local puede ensayarse en condiciones semejantes y ajustarse según el resultado; no debería presentarse de inmediato

como norma regional. La participación de agricultores puede aportar información sobre variedades, calendario efectivo, precio recibido, pérdidas poscosecha y barreras logísticas. Ninguna de estas observaciones debe confundirse con un dato medido en el experimento de origen. Son componentes propuestos para investigaciones posteriores y para procesos de validación participativa.

Tabla 2. Escalas de observación en una agricultura de montaña

Escala	Objeto de estudio	Límite de inferencia
Planta	Fenología, raíz, vainas, granos	No sustituye la unidad experimental parcela.
Parcela	Disponibilidad nutricional y rendimiento	Es la unidad pertinente de los tratamientos.
Ladera / finca	Gradiente, rotación, secano o riego	La heterogeneidad requiere muestreo.
Microcuenca	Acceso a agua, erosión y flujos	No se deduce de un solo ensayo local.
Región	Oferta agrícola, articulación comercial	Requiere estadística representativa.

Fuente: Elaboración editorial propia, sustentada en las fuentes científicas citadas en los apartados correspondientes; categorías analíticas, no mediciones de campo.

1.4. Importancia alimentaria y calidad del grano

Las leguminosas de grano ocupan un lugar relevante en dietas donde se combinan alimentos de origen vegetal. El frijol aporta proteína, fibra y distintos componentes minerales, aunque la composición final depende de la variedad, el ambiente, el estado del grano y el procedimiento de preparación. Nchanji y Ageyo (2021) realizaron una revisión sistemática y metaanálisis sobre efectos del consumo de frijol común en la salud; Lisciani et al. (2024) analizaron su papel en dietas sostenibles y preparaciones alimentarias. Es importante distinguir las propiedades generales de un alimento de afirmaciones clínicas específicas: la evidencia nutricional no autoriza atribuir efectos terapéuticos a una cosecha particular sin un estudio apropiado.

La calidad no es una cifra única. Para quien selecciona semilla, puede significar pureza varietal y poder germinativo; para el productor de grano seco, uniformidad de tamaño, limpieza y humedad adecuada; para el comprador, apariencia, cocción y ausencia de daños; para el especialista en nutrición, concentración y biodisponibilidad de componentes. Estas dimensiones se relacionan, pero ninguna puede deducirse automáticamente del peso de cien granos. Por eso, en el experimento de Cajabamba el indicador de masa debe interpretarse estrictamente como componente productivo y no como prueba de mejora nutricional o de aceptación comercial.

La biofortificación plantea otra escala de análisis. La concentración de hierro y zinc depende tanto de factores genéticos como ambientales, y su presencia química no equivale necesariamente a la proporción absorbida por el consumidor. La investigación de interacción genotipo-ambiente de Eizenga y colaboradores, citada habitualmente en la discusión de frijol, y los estudios recientes sobre minerales en granos muestran que un programa de mejoramiento necesita medir simultáneamente rendimiento y calidad. En esta obra la cuestión se utiliza para orientar futuras investigaciones: el archivo base no presenta análisis de hierro, zinc, digestibilidad ni biodisponibilidad para la variedad Cápsula, y sería incorrecto adjudicarle resultados no determinados.

La seguridad alimentaria también depende del acceso. Un cultivo de buen rendimiento puede beneficiar al agricultor si existe precio y mercado apropiados, pero el efecto neto sobre el bienestar doméstico cambia con el costo de producción, la estabilidad de la oferta y la disponibilidad de alimentos alternativos. La FAO, junto con organismos internacionales, relaciona la seguridad alimentaria con la posibilidad de adquirir dietas saludables y con la vulnerabilidad de hogares de ingresos bajos frente a la inflación de alimentos (FAO et al., 2025). Esto no permite deducir el comportamiento de precios en Huacrachuco; ofrece un marco para considerar que productividad y bienestar son dimensiones conectadas, aunque analíticamente distintas.

La ampliación editorial sitúa así al frijol como especie simultáneamente agronómica y social. Una investigación de fertilización bien comunicada debe evitar tanto el reduccionismo productivista como la promesa excesiva de resolver por sí sola problemas alimentarios. Sus resultados contribuyen a mejorar decisiones sobre insumos y procesos, mientras que la nutrición, la comercialización y la sostenibilidad demandan indicadores propios. El rendimiento tiene enorme importancia, pero se vuelve mucho más útil cuando se conoce su lugar dentro del sistema de producción y consumo.

1.5. Desde el potencial genético hasta una producción verificable

Hablar de potencial no es lo mismo que hablar de resultado esperado. El potencial de un cultivar se expresa bajo condiciones favorables y constituye una referencia fisiológica; el rendimiento alcanzable depende de límites ambientales y del manejo; el rendimiento efectivamente cosechado refleja además pérdidas, calidad de ejecución y heterogeneidad.

Esta distinción ayuda a evitar comparaciones descontextualizadas entre estudios. Dos parcelas con una media similar pueden haber llegado a ella por combinaciones distintas de plantas, vainas y peso de semilla, y dos estudios con medias diferentes pueden estar separados por clima, material genético, sanidad y criterios de cosecha.

La interpretación regional requiere identificar factores dominantes en cada escala. La semilla determina parte de la respuesta genética; el suelo regula la disponibilidad nutricional y el agua; el régimen hídrico impone límites a la fotosíntesis y al transporte; el manejo define la oportunidad de aplicar recursos; el mercado condiciona la viabilidad económica. En el caso de la variedad Cápsula, la evidencia disponible permite discutir diferencias de respuesta a tres paquetes de fertilización en un único entorno. No permite inferir la estabilidad de la respuesta entre campañas ni afirmar que la genética o la disponibilidad hídrica fueran constantes fuera de la experiencia descrita.

White et al. (1988) reunieron conceptos básicos de fisiología del frijol de interés para la interpretación de crecimiento, desarrollo y rendimiento. En regiones andinas, el manual de Vásquez García y Vilca Valqui (2023), publicado por el Instituto Nacional de Innovación Agraria, constituye una referencia técnica contextual para el manejo del cultivo. Son fuentes de naturaleza distinta: una aporta fundamentos fisiológicos y la otra criterios aplicados. Ninguna sustituye una prueba específica de fertilización para la variedad Cápsula en Cajabamba.

La selección de indicadores debe seguir la pregunta. Si interesa saber si una tecnología mejora emergencia, se mide población establecida; si se busca explicar una deficiencia de fósforo, se requiere diagnóstico edáfico y posiblemente observación de raíces; si se examina un sistema de producción sostenible, pueden añadirse eficiencia de uso del fertilizante, balance de nutrientes, efectos sobre suelo y retorno económico. El error metodológico aparece cuando un indicador disponible se utiliza para responder preguntas que no fue diseñado para contestar. La cifra de rendimiento es indispensable, pero no revela por sí sola cuánto nutriente absorbió la planta ni qué parte provino del fertilizante.

En una agronomía de precisión conceptual, los términos se usan con cuidado. «Respuesta al tratamiento» significa diferencia observada entre condiciones ensayadas; «efecto aislado del fósforo» exige que el diseño permita separarlo de los demás factores; «óptimo económico» requiere valores monetarios y una regla de comparación;

«recomendación regional» demanda validación externa. Esta disciplina de lenguaje no resta fuerza al conocimiento: lo hace replicable. El estudio de base conserva su aporte como comparación de paquetes N-P-K y como caso para discutir los requisitos de una recomendación más amplia.

Diversidad, adaptación y sentido del nombre varietal

La denominación varietal funciona como una pieza de trazabilidad biológica. Dos semillas que comparten el nombre común «frijol» pueden pertenecer a materiales con ciclos, arquitectura y sensibilidad ambiental diferentes; incluso una variedad conocida comercialmente puede mostrar heterogeneidad si no existe control de identidad y pureza. Para evaluar una respuesta fertilizante, resulta útil registrar el origen del lote, características descriptivas, comportamiento de emergencia y condiciones de conservación. Estas observaciones no sustituyen los análisis genéticos, pero permiten delimitar con mayor precisión el objeto que realmente se ensayó. En el material base se indica semilla certificada de la variedad Cápsula y su procedencia institucional; no se incorpora una ficha genética detallada.

El potencial de respuesta a nutrientes es una propiedad del sistema genotipo-ambiente-manejo, no un atributo invariable del nombre varietal. Un material con fuerte crecimiento vegetativo puede competir de forma distinta por recursos durante reproducción respecto de otro que concentra su producción en una fase breve. El tamaño de grano y la forma de crecimiento pueden alterar tanto las expectativas del agricultor como los criterios de selección. El diseño que compara una sola variedad controla parcialmente esa fuente de variación, pero no mide la interacción con otros materiales. Al transferir resultados, el primer paso consiste en verificar si el cultivar utilizado por el productor corresponde efectivamente al del estudio.

La conservación de diversidad puede tener valor frente a riesgos cambiantes. Las poblaciones locales y los programas de mejoramiento conservan alternativas para adaptación a plagas, enfermedades, sequía y diferentes necesidades alimentarias. Porch et al. (2013) discuten el papel de parientes silvestres y especies relacionadas en las respuestas al cambio climático, mientras Beebe et al. (2013) examinan rasgos de adaptación a sequía. Estos enfoques no implican que una variedad ancestral sea necesariamente más resistente ni que

todo material mejorado resulte más productivo: plantean la conveniencia de comparar genotipos mediante características medibles y no mediante etiquetas de origen.

La evaluación genética y la fertilización pueden reforzarse cuando se planifican conjuntamente. Un material capaz de explorar mejor el suelo podría aprovechar una fuente de fósforo de manera diferente; uno que establezca nódulos funcionales bajo ciertas condiciones podría necesitar otra estrategia de nitrógeno. La agricultura no necesita elegir entre cultivar o fertilizante como explicaciones rivales: necesita estimar cómo se relacionan. En Cajabamba esa interacción queda como una pregunta abierta, porque el estudio no manipuló genotipos. La distinción permite usar la investigación original como antecedente para un ensayo varietal sin presentar como hallazgo una diferencia genética que nunca fue medida.

Fenología y distribución de recursos

La fenología convierte el ciclo de vida del cultivo en una secuencia de ventanas de oportunidad. La emergencia requiere reservas de la semilla y condiciones de germinación; el establecimiento radical prepara la adquisición de agua y minerales; la expansión foliar crea la superficie fotosintética; la floración y el llenado de semilla reorganizan la demanda de recursos. Las intervenciones agrícolas se vuelven más eficaces cuando su oportunidad coincide con la etapa que pretende favorecer. Un calendario expresado solo en días después de la siembra puede resultar insuficiente si temperatura y disponibilidad hídrica modifican la velocidad de desarrollo.

Una planta no asigna de manera idéntica sus recursos a todos los órganos. La formación de nuevas hojas puede aumentar la capacidad de captar luz, pero también requiere carbono y nutrientes. Durante el llenado, las semillas se convierten en destinos relevantes de asimilados; una reducción anterior del área foliar puede limitar ese proceso, mientras que ciertas condiciones pueden favorecer remobilización de reservas. Ningún componente de rendimiento funciona como causa única. Un número alto de vainas necesita acompañarse de suficiente disponibilidad de recursos para sostener granos; de lo contrario puede producirse compensación en tamaño y llenado.

La fertilización nitrogenada se relaciona con esos cambios temporales. Aplicar todo el nitrógeno antes de que la planta pueda utilizarlo puede generar una sincronización imperfecta; diferirlo excesivamente puede dejar sin respuesta etapas críticas. La presencia de

una simbiosis funcional cambia adicionalmente la dinámica de suministro. Para estudiar con rigor estos procesos se necesita registrar fenología y, cuando sea posible, concentraciones de nutrientes en tejidos. El documento original señala un fraccionamiento del nitrógeno, pero no ofrece una serie de crecimiento que permita comparar directamente tasas de absorción entre sus tratamientos.

El seguimiento fenológico también mejora la interpretación de problemas meteorológicos. Un episodio de calor durante una etapa vegetativa puede tener consecuencias diferentes de otro durante reproducción; el efecto de un déficit de agua depende de duración y momento. Por ello, en un ensayo de validación convendría asociar cada medición de clima con el estado del cultivo y no solo con la fecha del calendario. Esta práctica permitiría distinguir si la variación de rendimiento entre campañas proviene de diferencias en nutrición, de desajustes entre oferta y demanda o de estrés coincidente con una etapa sensible.

Territorio, accesibilidad y escala de decisión

El territorio influye en las posibilidades de adoptar una tecnología tanto como en sus resultados biológicos. En una zona andina, transportar insumos puede suponer una proporción importante del costo total, especialmente cuando las parcelas son pequeñas o se encuentran lejos de los puntos de venta. Las oportunidades de crédito, mano de obra y comercialización pueden modificar qué alternativa parece razonable aunque dos productores obtengan rendimientos semejantes. Por eso conviene evitar que una recomendación producida en estación experimental se difunda como solución completa sin examinar las condiciones económicas de la explotación destinataria.

La parcela experimental controla deliberadamente muchas variables que en la finca real pueden cambiar simultáneamente. La superficie pequeña facilita vigilancia y aplicación precisa, pero las labores a mayor escala pueden presentar otras restricciones. La disponibilidad oportuna de agua, la uniformidad del terreno y la capacidad de pesar dosis exactas resultan más difíciles en ciertos contextos. La transferencia exige un paso adicional de prueba de campo participativa, donde el productor implemente la alternativa con recursos y calendario reales y se documenten las condiciones de ejecución. La ausencia de ese paso puede generar expectativas desproporcionadas.

La integración territorial tiene una dimensión organizativa. Asociaciones de productores, instituciones agrarias y universidades pueden coordinar análisis de suelo, adquisición de insumos, registros de rendimiento y ensayos comparativos que de manera individual resultarían costosos. Sin embargo, la agregación institucional no debe diluir la diversidad de unidades productivas; una recomendación promedio puede ser inadecuada para parcelas con suelos o recursos hídricos diferentes. La utilidad de una red de extensión depende de clasificar ambientes y de ofrecer alternativas condicionadas, no de imponer una fórmula uniforme.

La escala regional también puede asociarse con objetivos públicos de seguridad alimentaria, empleo y conservación. Estos intereses exceden la pregunta original sobre rendimiento, aunque le confieren relevancia social. Una política de apoyo a fertilización, por ejemplo, debería evaluar si existe una restricción nutricional comprobable, si el suministro del insumo llega a tiempo y si se consideran efectos en margen e incentivos ambientales. Sin esos criterios, un subsidio o paquete generalizado podría amplificar ineficiencias. La investigación agrícola contribuye a la política cuando ofrece evidencia diferenciada y muestra de manera transparente qué conclusiones se sostienen.

Calidad poscosecha y criterios de mercado

La calidad comercial del frijol se decide en procesos que empiezan antes de la cosecha y continúan después de ella. La uniformidad de madurez y tamaño, la presencia de daño, la limpieza del lote y el contenido de humedad influyen en la conservación y el precio. Un incremento de rendimiento a campo no se transforma automáticamente en ingreso equivalente si aparecen pérdidas durante secado, almacenamiento o comercialización. Por ello es conveniente separar rendimiento biológico, rendimiento comercializable y precio neto. El documento de origen reporta masa de grano por parcela y hectárea, pero no discrimina pérdidas poscosecha ni clasificaciones comerciales.

La dimensión nutricional añade otra complejidad: el contenido total de minerales no equivale a su biodisponibilidad. La preparación culinaria, la composición del alimento y los compuestos que interactúan con la absorción condicionan la utilidad nutricional. Lisciani et al. (2024) consideran el frijol dentro de dietas sostenibles, mientras Nchanji y Ageyo (2021) analizan ensayos clínicos y de intervención asociados a su consumo. Esas fuentes justifican estudiar el frijol como alimento, pero no demuestran que una dosis NPK específica produzca

un grano más saludable en el ensayo de Cajabamba. Para sostener esa afirmación serían necesarias determinaciones químicas y, según el objetivo, ensayos de biodisponibilidad apropiados.

La preferencia de los compradores puede divergir de una definición puramente agronómica de calidad. En algunos segmentos se favorecen granos grandes y uniformes; en otros importan color, forma o rendimiento culinario. Los agricultores manejan esas señales de mercado al elegir semilla y decidir la proporción de producción destinada a autoconsumo o venta. Un programa de investigación orientado a adopción debería discutir con los usuarios finales qué atributos desean, diseñar mediciones reproducibles y conservar por separado datos de rendimiento y de calidad. La misma variedad puede resultar adecuada para diferentes destinos, pero esa adecuación debe documentarse.

La evaluación de calidad puede generar decisiones distintas de las basadas en kg/ha. Si un tratamiento produjera más masa pero un grano menos aceptado comercialmente, el mayor volumen no garantizaría mayor margen. Si otro ofreciera menor rendimiento con mejor precio, la comparación económica podría invertirse. Estos son escenarios conceptuales, no resultados del ensayo de origen. Precisamente por eso es importante que la futura investigación incorpore indicadores de calidad y de mercado solo cuando pueda medirlos, evitando extraer de la masa de cien granos afirmaciones que no se hallan respaldadas.

Cómo construir una hipótesis causal a partir de un rendimiento observado

Una hipótesis agronómica útil debe especificar el proceso que se propone y la evidencia que permitiría refutarlo. La afirmación «T2 mejoró porque hubo más fósforo» es insuficiente cuando al mismo tiempo cambian nitrógeno y potasio. Una hipótesis más rigurosa preguntaría si, manteniendo constantes N y K, el incremento de fósforo produce cambios detectables en desarrollo radical, número de vainas y rendimiento. El diseño correspondiente requeriría tratamientos específicos y mediciones acordes con ese mecanismo. Esta diferencia entre explicación plausible y explicación identificada determina la calidad de la investigación posterior.

La formulación de hipótesis también requiere considerar explicaciones alternativas. Si los tratamientos fertilizados muestran más producción que el testigo, el resultado es compatible con una limitación nutricional inicial; sin embargo, no separa automáticamente el

efecto de cada elemento ni descarta interacciones. Podrían existir diferencias de emergencia o de condiciones microambientales que, aunque controladas parcialmente por bloques, contribuyan a la variabilidad. Un modelo útil jerarquiza estas posibilidades según el diseño disponible y selecciona nuevas variables para evaluarlas. No debe inventar mediciones de fotosíntesis o nodulación que no se hicieron.

La investigación acumulativa procede por sucesivas reducciones de incertidumbre. El primer ensayo identifica una respuesta productiva a paquetes NPK; el siguiente puede aislar componentes; otros evalúan estabilidad entre campañas, interacciones con agua y balance económico. No se exige que un único experimento conteste todas las preguntas. Por el contrario, su aporte puede ser mayor si define claramente el siguiente conjunto de contrastes y conserva los datos completos. La trazabilidad del material original permite convertir un resultado local en parte de un programa ordenado de evidencia.

Desde la escritura científica, el mismo principio orienta el lenguaje. Es legítimo decir que los tratamientos fertilizados superaron al testigo y que T2 obtuvo el mayor promedio de rendimiento registrado. No es equivalente afirmar que T2 contiene la mejor proporción universal de nutrientes o que garantiza la mayor rentabilidad. El reconocimiento de estas fronteras permite aprovechar el experimento sin reducirlo a propaganda tecnológica. Una obra de formación agronómica debe enseñar simultáneamente a descubrir respuestas y a proteger al lector de inferencias excesivas.

Domesticación, diversidad útil y límites de la identidad varietal

La domesticación del frijol común está vinculada con el aprovechamiento de semillas y formas de crecimiento que podían adaptarse a sistemas agrícolas diversos. El proceso histórico seleccionó rasgos visibles, como color y tamaño del grano, y caracteres funcionales relacionados con la duración del ciclo, la arquitectura de la planta y la compatibilidad con ambientes de cultivo. La diversidad que hoy existe entre materiales vegetales no debe concebirse como una simple colección de nombres comerciales. Constituye un conjunto de respuestas potenciales a clima, suelo, enfermedades y preferencias alimentarias. Comprenderla permite explicar por qué una dosis de fertilización ensayada con un material no necesariamente tendrá el mismo desempeño con otro.

La nomenclatura botánica identifica a la especie, pero no describe exhaustivamente la variedad. Para evaluar adaptación agronómica interesa registrar procedencia de semilla, características del lote, hábito de crecimiento, duración de fases fenológicas y cualidades de cosecha. La fuente original especifica el uso de material Cápsula con semilla obtenida del INIA, aunque no presenta una descripción genética exhaustiva que permita comparar su identidad con todos los materiales homónimos. La obra conserva ese dato en sus propios términos y evita añadir un perfil molecular inexistente. Una futura caracterización podría incorporar marcadores y descriptores estandarizados, siempre diferenciándolos de los rasgos medidos en la campaña histórica.

La diversidad genética también afecta la oportunidad de intervenir. Una variedad precoz puede concentrar demandas en un intervalo más breve, mientras otra de ciclo más largo puede distribuir crecimiento y reproducción de modo diferente. Estas posibilidades requieren verificación en cada material. La fertilización que resulta oportuna para una fenología no puede trasladarse sin ajuste cuando cambian floración y llenado. La literatura sobre desempeño bajo déficit de agua y fósforo, como Smith et al. (2022), recuerda que la variación entre genotipos puede modificar respuestas a restricciones ambientales. El vínculo con el ensayo original es una hipótesis comparativa, no una medición sobre todos los cultivares disponibles en Huánuco.

Escalas de seguridad alimentaria y valor social del cultivo

El interés del frijol trasciende su resultado agronómico porque aporta proteína vegetal, energía alimentaria y otros componentes de la dieta. Sin embargo, la importancia nutricional no autoriza a presentar una cifra fija como composición universal de cada grano. La composición puede diferir por variedad, ambiente, madurez y método de análisis; además, los valores publicados suelen expresarse en bases de humedad distintas. Una obra científica debe identificar si una tabla corresponde a grano seco, cocido o a una porción específica antes de comparar proteínas, fibra y micronutrientes. El estudio agronómico de Cajabamba se enfocó en productividad, no en análisis químico de composición de semilla.

La contribución a la seguridad alimentaria depende también de accesibilidad. Producir más no garantiza automáticamente una dieta más diversa si la comercialización dirige toda la cosecha fuera del territorio o si existen pérdidas de almacenamiento. La estabilidad del suministro, los precios recibidos por las familias productoras, la capacidad de

conservar semilla y la disponibilidad de medios de preparación son dimensiones complementarias. Un proyecto que evalúe fertilización y productividad puede incorporar posteriormente indicadores de destino de producción, autoconsumo y calidad, pero necesita levantarlos mediante instrumentos apropiados. No es admisible deducir efectos sobre nutrición familiar a partir de diferencias estadísticas de kg/ha.

El grano seco puede funcionar como un bien de intercambio y un componente de estrategias de subsistencia. Sus ventajas prácticas pueden incluir almacenamiento y transporte cuando se cumplen condiciones adecuadas, aunque deben considerarse pérdidas por humedad e insectos. El beneficio comercial de un mayor volumen depende del mercado real, no de un precio idealizado. En regiones con parcelas pequeñas, la disponibilidad de crédito, vías de comunicación y capacidad de negociación puede limitar la ganancia aun cuando la producción por hectárea mejore. Esta separación entre potencial técnico y resultado económico es esencial para evitar que una investigación experimental se convierta en promesa de ingresos no sustentada.

El sistema alimentario conecta, además, producción y consumo con criterios de calidad. Tamaño, color, cocción y uniformidad pueden afectar aceptación según mercado, pero esas preferencias deben investigarse y no suponerse. El peso de 100 granos observado en la tesis representa un componente de rendimiento, no por sí solo un índice completo de calidad comercial. Un programa futuro podría acompañar la comparación agronómica con análisis de calidad y preferencias, utilizando métodos transparentes y participantes debidamente informados. Así se distinguiría el éxito en la parcela del valor que efectivamente recibe el productor.

El territorio andino como mosaico y no como promedio

Huacrachuco no debe interpretarse como una superficie homogénea únicamente por aparecer bajo un mismo nombre administrativo. Las diferencias de altitud, orientación de laderas, exposición a vientos, disponibilidad de agua y posición en la pendiente generan ambientes de cultivo contrastantes. El suelo puede variar dentro de distancias relativamente cortas por historia geomorfológica y manejo previo. Una media regional o municipal resulta útil para contextualizar, pero no sustituye el diagnóstico del terreno donde se aplicará fertilizante. Esta es una limitación central de la extrapolación de resultados de una estación o una parcela a todas las fincas de una jurisdicción.

La pendiente afecta tanto la distribución de agua como la conservación de suelo. Un lote con erosión puede perder fracciones fértiles de la capa superficial, mientras sectores de deposición pueden acumular materiales diferentes. En algunos casos, las prácticas de conservación y el manejo de residuos podrían ofrecer beneficios previos o complementarios a la fertilización. La respuesta a NPK puede depender de esas condiciones, incluso cuando la variedad y dosis son las mismas. El libro propone una lectura integrada de territorio y nutrición sin asignar tasas de erosión, pérdidas de fertilizantes o profundidades efectivas a localidades que no fueron medidas.

Una investigación multilocal bien diseñada debe ordenar esta heterogeneidad en estratos interpretables. Podrían seleccionarse sitios por niveles de fertilidad, presencia de riego, clases de textura o intervalos altitudinales pertinentes. Las parcelas dentro de cada sitio seguirían su propio diseño y los resultados se integrarían mediante un análisis que conserve la identidad de localidad y campaña. El objetivo no es eliminar la diversidad natural, sino comprender dónde las recomendaciones funcionan y dónde dejan de ser pertinentes. En este sentido, el ensayo de Cajabamba aporta una referencia localizada y un procedimiento experimental desde el cual construir preguntas territoriales más amplias.

La representación geográfica necesita prudencia documental. Las coordenadas de la tesis identifican el entorno experimental, pero no sustituyen un levantamiento actual del terreno ni demuestran continuidad de uso agrícola en el mismo lote. Del mismo modo, las condiciones meteorológicas consignadas para los meses observados corresponden a esa fuente y no a un clima constante. Reproducir la investigación hoy demandaría verificar el sitio, las prácticas existentes y las fuentes oficiales recientes. La utilidad de una obra científica reside precisamente en preservar la trazabilidad histórica para permitir comparaciones que respeten los cambios de contexto.

La síntesis del primer capítulo conduce a una idea central: el frijol común es un sistema biológico diverso cuyo rendimiento emerge de procesos múltiples y se inserta en territorios concretos. Para comprender qué puede hacer la fertilización, hay que examinar ahora la fisiología de los nutrientes y la relación entre nutrición mineral y fijación biológica. Ese desplazamiento desde la especie y el territorio hacia los mecanismos constituye el siguiente paso del argumento.

Tabla 3. Funciones diferenciadas de los nutrientes en el sistema suelo-planta

Componente	Papel dominante	Interpretación agronómica
Nitrógeno	Asimilación y síntesis de compuestos nitrogenados	Su manejo exige considerar la fijación simbiótica.
Fósforo	Transferencia de energía y establecimiento radical	La disponibilidad depende de la química del suelo.
Potasio	Regulación osmótica y enzimática	Su interacción con agua y otros cationes es crítica.
Calcio, Mg y S	Estructura celular, fotosíntesis y metabolismo	No deben omitirse del diagnóstico.
Micronutrientes	Cofactores y procesos específicos	La dosis depende de deficiencias comprobadas.

Fuente: Elaboración editorial propia, sustentada en las fuentes científicas citadas en los apartados correspondientes; categorías analíticas, no mediciones de campo.

CAPÍTULO II

LA FISIOLOGÍA DE LA NUTRICIÓN MINERAL Y LA SIMBIOSIS

La respuesta del frijol a una fertilización mineral solo puede interpretarse si se comprende qué ocurre entre el fertilizante aplicado y el grano cosechado. El nutriente atraviesa una secuencia de disponibilidad edáfica, absorción radical, transporte, transformación metabólica y distribución entre órganos. Cada etapa introduce restricciones y oportunidades de regulación. El nitrógeno añade una singularidad: parte de su suministro puede proceder de una relación simbiótica y no solo de los compuestos minerales del suelo. Este capítulo relaciona los tres macronutrientes del ensayo con mecanismos de la planta y con problemas que los nuevos estudios han puesto de relieve.

2.1. Una lectura funcional de los elementos esenciales

Los elementos minerales esenciales no son equivalentes entre sí. Una parte integra estructuras y compuestos orgánicos, otra participa en sistemas de transferencia de energía y regulación enzimática, y otra sostiene procesos de señalización o balance osmótico. La planta no puede compensar indefinidamente la carencia crítica de un elemento mediante el exceso de otro. De ahí que la nutrición equilibrada no signifique aplicar proporciones fijas a cualquier suelo, sino procurar que los requerimientos de la planta encuentren una oferta utilizable en las etapas oportunas. Marschner (2012) y Havlin et al. (2014) proporcionan marcos clásicos para estudiar estas relaciones entre nutrición, suelo y producción.

La raíz absorbe iones presentes en la solución del suelo mediante rutas pasivas y mecanismos de transporte regulado. El acceso a estos iones depende de su concentración, de la capacidad del suelo para reponerlos y de la geometría de exploración radical. Nutrientes como el nitrato pueden desplazarse con el agua y perderse por lixiviación en determinadas condiciones, mientras que el fosfato suele tener movilidad más restringida y depender de su difusión cerca de las superficies radicales. El potasio presenta comportamiento intermedio y relación compleja con los sitios de intercambio de minerales del suelo. La diferenciación

importa porque un mismo momento de fertilización no asegura igual eficiencia para todos los componentes.

La demanda nutricional varía con el desarrollo del cultivo. Una plántula necesita recursos para establecer raíces y área foliar, pero la presión sobre la planta cambia cuando aparecen los botones florales y comienza el llenado de vainas. La absorción total y el ritmo diario de demanda no son constantes. Coelho et al. (2024) documentaron diferencias en acumulación de N, P y K entre cultivares de frijol sometidos a grados distintos de déficit de agua, así como variación entre campañas. Este tipo de resultado muestra que la cantidad final absorbida no describe por completo la oportunidad de suministro: importa cuándo la planta pudo adquirir cada elemento.

El uso agronómico de términos como suficiencia, deficiencia o toxicidad exige medir y contextualizar. Una hoja amarillenta puede obedecer a carencia nutricional, estrés hídrico, enfermedad o senescencia; el diagnóstico visual resulta orientativo, pero no necesariamente específico. El análisis de suelo permite examinar la oferta potencial y el análisis de tejidos puede ayudar a relacionarla con el estado de la planta. La respuesta en rendimiento, por su parte, ofrece una prueba funcional, siempre que el diseño permita distinguir el efecto del insumo frente a otras fuentes de variación. Ninguna de estas herramientas debe sustituir automáticamente a las demás.

Tabla 4. Vocabulario operativo para evaluar una respuesta nutricional

Término	Significado de trabajo	Precaución
Dosis	Cantidad de nutriente o fertilizante aplicada	Debe indicarse unidad y base química.
Fuente	Material comercial que aporta el nutriente	La composición comercial no es la dosis de nutriente.
Eficiencia agronómica	Rendimiento adicional por nutriente aplicado	No identificable para cada nutriente en este ensayo NPK conjunto.
Óptimo agronómico	Dosis con máximo rendimiento dentro de un modelo	No se identifica necesariamente con el mayor promedio observado.
Óptimo económico	Dosis con beneficio neto superior	Requiere precios y costos efectivos.

Fuente: Elaboración editorial propia, sustentada en las fuentes científicas citadas en los apartados correspondientes; categorías analíticas, no mediciones de campo.

2.2. Nitrógeno mineral y fijación biológica

El nitrógeno participa en aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, pigmentos y moléculas relacionadas con el crecimiento. Su carencia puede restringir la expansión del follaje y el establecimiento de estructuras reproductivas; una oferta inadecuadamente

concentrada también puede desequilibrar crecimiento vegetativo y reproducción. En las leguminosas, sin embargo, el suministro de nitrógeno presenta una complejidad adicional: bacterias compatibles pueden inducir nódulos radicales donde se fija N atmosférico a formas utilizables por la planta. La existencia de la capacidad simbiótica no significa que todas las plantas la ejerzan con la misma intensidad ni que la fijación alcance siempre a satisfacer sus necesidades.

La simbiosis tiene costos energéticos. La planta aporta compuestos carbonados para sostener la actividad microbiana, mientras el microorganismo contribuye con nitrógeno reducido. Si el crecimiento radical está limitado por sequía, pH desfavorable o deficiencia de fósforo, esa relación puede deteriorarse. El efecto del nitrógeno mineral debe analizarse por sus dos vías: aporte directo a la planta e influencia potencial sobre la iniciación o actividad de los nódulos. La magnitud y dirección de esta influencia dependen de dosis, etapa, hospedero y población de rizobios. El ensayo original no registró nodulación ni fijación de nitrógeno, por lo que ninguna conclusión sobre estos procesos debe presentarse como hallazgo local.

Reinprecht et al. (2020) estudiaron los efectos de la aplicación nitrogenada sobre la fijación en la producción de frijol. Sus resultados y los avances posteriores insisten en que el nitrógeno aportado externamente y el nitrógeno fijado constituyen componentes de una misma economía fisiológica. La fertilización mineral puede ser útil en ciertas condiciones de baja disponibilidad, pero una estrategia que ignore el estado de la simbiosis corre el riesgo de elevar costos sin capturar el potencial biológico del cultivo. Para evaluar alternativas, conviene distinguir respuesta inmediata del crecimiento y efectos durante la etapa reproductiva.

Los inoculantes bacterianos representan una posibilidad técnica, no una solución automática. Gatabazi et al. (2024) evaluaron un inoculante de Rhizobium tropici y describieron respuestas de crecimiento, rendimiento y concentración de nitrógeno; Reis et al. (2023) estudiaron la asociación de fertilización organomineral con inoculación y coinoculación. La generalización depende de la compatibilidad con el genotipo, la supervivencia del inoculante, el estado nutricional del suelo y la presencia de poblaciones nativas de rizobios. La comparación de productos comerciales requiere experimentos específicos, controles apropiados y verificación de identidad y viabilidad de cepas.

La investigación sobre nódulos bajo sequía revela otra dificultad. Da Silva et al. (2024) describieron cambios en la respuesta transcriptómica de nódulos de dos genotipos ante déficit hídrico, incluyendo alteraciones en rutas metabólicas y genes relacionados con el estrés. No se debe extrapolar de ese estudio una tasa concreta de fijación para la variedad Cápsula; sí es razonable inferir que la simbiosis forma parte de los mecanismos sensibles al ambiente. Una recomendación que busque sustituir parte del nitrógeno mineral por fijación biológica deberá considerar agua, fósforo, microbiología y productividad, con mediciones directas de la respuesta.

El valor de un programa integrado reside en contrastar alternativas con rigor. Un diseño futuro podría comparar la fertilización de fondo con y sin inoculación, manteniendo constantes otros factores, y añadir tratamientos donde el nitrógeno mineral varíe de forma independiente. La respuesta debería examinar producción, nódulos funcionales y rendimiento económico. Los resultados del caso Cajabamba ofrecen un punto de referencia para formular esa pregunta, pero no permiten responderla retrospectivamente porque el diseño modificó simultáneamente N, P y K.

2.3. El fósforo entre la química del suelo y la arquitectura radical

El fósforo integra moléculas esenciales para transferencia de energía, metabolismo y estructura celular. Su papel durante el establecimiento y la reproducción no debe reducirse a una etiqueta de «nutriente de raíz», aunque la disponibilidad fosfatada influye decisivamente en el desarrollo y funcionamiento radical. El problema agronómico principal suele estar menos relacionado con la cantidad total de fósforo presente en el suelo que con la fracción efectivamente accesible a las raíces. Reacciones de sorción, precipitación y transformación orgánica pueden limitar esa fracción bajo distintas condiciones de pH y mineralogía.

La arquitectura radical determina qué volumen de suelo explora la planta y con qué intensidad se interceptan superficies que contienen fosfato. La ramificación, densidad de raíces finas, longitud de pelos radicales y distribución de crecimiento responden a señales ambientales y nutricionales. Chen et al. (2023) revisaron el mejoramiento de la adquisición de fósforo mediante modificaciones de crecimiento radical en leguminosas, subrayando la plasticidad de sus respuestas a la carencia. El punto no es que una arquitectura resulte

universalmente superior, sino que la eficiencia de adquisición depende de que las raíces exploren las zonas donde el nutriente está disponible.

El agua condiciona la movilización del fosfato y el funcionamiento de la raíz. Cuando disminuye la humedad del suelo se modifica la difusión de iones y el intercambio entre superficie radical y matriz edáfica; además, la planta puede reducir fotosíntesis y crecimiento. Smith et al. (2022) estudiaron genotipos de frijol sometidos a déficit hídrico y baja disponibilidad de fósforo y documentaron pérdidas de productividad bajo ambos factores, individualmente y combinados. La importancia de esa evidencia radica en que el efecto de fertilizar no siempre puede juzgarse independientemente de la condición hídrica: un nutriente presente puede resultar poco aprovechable si faltan condiciones para adquirirlo y utilizarlo.

En campo, el manejo del fósforo exige evaluar la fuente, la colocación y la respuesta esperada en suelo específico. El superfosfato triple se utilizó en el experimento de Cajabamba, pero el solo hecho de haberlo aplicado no permite conocer qué fracción fue absorbida ni cuánto quedó retenido en el suelo. Para estimar esas magnitudes serían necesarios análisis complementarios de suelo y tejido. Cuando se comparan tratamientos con paquetes NPK completos, además, se vuelve imposible atribuir con seguridad al fósforo toda la ventaja frente al testigo. El cambio observado corresponde a la combinación nutricional efectivamente ensayada.

Un enfoque de manejo preciso distingue entre corrección y mantenimiento. Si el suelo presenta escasez de fósforo disponible, una aplicación puede buscar remover un factor limitante; si el nivel ya es suficiente, el objetivo podría relacionarse con la reposición de exportaciones o la estabilidad del sistema. No es metodológicamente apropiado fijar una dosis por simple analogía con otra región. Kassa y Kifle (2023) trabajaron sobre calibración de fertilizantes a partir de pruebas de suelo, ilustrando que la recomendación debe surgir de diagnóstico y respuesta local. La calibración es especialmente importante cuando se desea formular una orientación institucional o comercial.

2.4. Potasio, balance de agua y llenado de grano

A diferencia del nitrógeno o del fósforo, el potasio no cumple principalmente la función de integrar moléculas orgánicas estructurales, sino que participa en regulación osmótica, activación enzimática y funcionamiento estomático. Estos procesos relacionan el

estado nutricional del cultivo con su economía hídrica. Una disponibilidad insuficiente puede perjudicar la regulación de procesos fisiológicos y la tolerancia funcional a condiciones variables, pero el efecto depende de las reservas del suelo y de las interacciones con calcio, magnesio y otros cationes. Una concentración muy elevada de fertilizante potásico no garantiza un rendimiento proporcionalmente superior.

El comportamiento del potasio en el suelo combina formas en solución, intercambiables y fracciones de liberación lenta asociadas a minerales. La relación entre estos compartimentos depende de textura, mineralogía, humedad y manejo histórico. En algunos sistemas, la disponibilidad de potasio es suficiente y las respuestas a aplicaciones adicionales resultan pequeñas; en otros, su reposición es necesaria para sostener extracciones de cosecha. El diagnóstico debe diferenciar la reserva química del ritmo en que esta se vuelve utilizable. Un análisis con resultado cualitativo «medio» no proporciona toda la información para proyectar la respuesta marginal de una nueva dosis.

La vinculación entre potasio y estrés hídrico ha sido examinada en estudios recientes de nutrición integrada. Teixeira et al. (2024) investigaron la absorción de nutrientes y la tolerancia a déficit de agua en frijol con tratamientos asociados al potasio y al silicio. La lección general es que la fisiología del agua y la nutrición mineral interactúan; no equivale a afirmar que los resultados de ese sistema expliquen directamente la diferencia entre T2 y T3 en Huacrachuco. Comparar investigaciones requiere reconocer material genético, condiciones experimentales y variables que cambian entre estudios.

En la experiencia de origen, el cloruro de potasio fue la fuente empleada. El empleo de KCl debe considerar el estado salino del suelo, calidad del agua y susceptibilidad del cultivo a condiciones que favorezcan acumulación de sales. No se presenta en la fuente un balance de cloruros ni un estudio de salinidad, de modo que no se puede deducir daño o beneficio específico por esa vía. Una recomendación futura podría comparar fuentes comerciales cuando existan razones edáficas para ello, incorporando tanto respuesta productiva como costo y disponibilidad local.

El peso de cien granos registrado en Cajabamba invita a explorar procesos de llenado de semilla. T2 alcanzó el máximo observado de 65 g, frente a 57 g del testigo. Esa asociación entre paquete nutricional y masa de semilla es un resultado del experimento; atribuir el diferencial exclusivamente al potasio sería, en cambio, una inferencia no identificable. El

diseño de paquetes combinados permite comparar alternativas completas, pero no aislar qué nutriente domina cada componente del rendimiento. El criterio de lectura es tan importante como la cifra: observación y explicación no son sinónimos.

2.5. Interacciones, micronutrientes y fronteras del diagnóstico

La idea de nutrición equilibrada puede formularse como un sistema de restricciones interdependientes. La absorción de un elemento depende de condiciones que pueden verse influidas por otro. La disponibilidad de fósforo incide en el establecimiento radical y en procesos energéticos de la simbiosis; la oferta de nitrógeno puede modificar la necesidad funcional de fijación; el potasio participa en procesos que se manifiestan de forma diferente según el agua disponible. De manera adicional, calcio, magnesio y azufre, así como micronutrientes como boro, zinc, hierro y molibdeno, cumplen funciones que deben considerarse cuando la evidencia diagnóstica sugiere limitaciones. Una fórmula NPK no describe por sí sola la fertilidad completa de un sistema.

Los estudios de formulaciones más complejas ofrecen contrastes útiles. Tadesse et al. (2022) evaluaron un manejo integrado de nitrógeno, fósforo, azufre, boro y estiércol en frijol, mientras que Kassa y Kifle (2023) estudiaron mezclas calibradas con base en la prueba de suelo. La presencia de varios nutrientes en esos experimentos demuestra la pertinencia de investigar restricciones múltiples, pero no convierte automáticamente a todas las formulaciones en recomendación para Huacrachuco. Una transferencia sería razonable solo después de conocer los valores analíticos del suelo local y de distinguir los nutrientes efectivamente limitantes.

La interpretación de síntomas debe ser cautelosa. Una clorosis puede confundirse con daño por patógenos, variación genotípica o edad foliar; una reducción del crecimiento radical puede derivarse tanto de compactación como de limitaciones químicas o hídricas. La observación sirve para definir hipótesis, no necesariamente para confirmarlas. El laboratorio aporta información complementaria, pero sus valores requieren metodología conocida, unidades y umbrales de interpretación pertinentes al cultivo. Un registro que únicamente clasifica algunos nutrientes como «bajos» y otros como «medios» es útil como orientación inicial, aunque insuficiente para estimar balances o modelos de respuesta cuantitativos.

La dosis eficaz se construye a través de un circuito de decisión. Primero se identifica la limitación productiva; después se recopila evidencia edáfica y climática; luego se eligen la fuente, la forma y el momento de aplicación; por último se contrasta la respuesta en rendimiento, calidad y costo. El orden importa: si el problema dominante es falta de agua, incrementar nutrientes puede no resolverlo; si el cuello de botella es fósforo, la respuesta a solo nitrógeno puede ser escasa. Las recomendaciones genéricas suelen fallar porque ignoran la jerarquía de factores limitantes dentro del sistema.

Tabla 5. Interacciones que pueden modificar la respuesta al fertilizante

Interacción	Mecanismo plausible	Lectura prudente
N × Rhizobium	El N disponible incide en nodulación y simbiosis	No se midió nodulación en la fuente.
P × humedad	Difusión de fosfato y crecimiento de raíces	No se ensayó déficit hídrico factorial.
K × agua	Control estomático y balance osmótico	No demuestra causalidad aislada en el ensayo.
pH × P	Fijación química y disponibilidad	Exige resultados de laboratorio detallados.
Cultivar × ambiente	Plasticidad y adaptación edafoclimática	Solo se incluyó la variedad Cápsula.

Fuente: Elaboración editorial propia, sustentada en las fuentes científicas citadas en los apartados correspondientes; categorías analíticas, no mediciones de campo.

La planta como sistema abierto de captación y asignación

La nutrición mineral suele enseñarse a partir de una lista de funciones de los elementos, pero esa representación se queda corta cuando el propósito es comprender una respuesta de campo. Una planta es un sistema abierto que intercambia agua, gases y solutos con el ambiente. La entrada de nutrientes se concentra principalmente en sus raíces y depende tanto del suelo como de la capacidad metabólica del organismo. El almacenamiento transitorio, la retranslocación y la incorporación a tejidos permanentes determinan qué fracción del nutriente absorbido acaba relacionada con la cosecha. Por tanto, el fertilizante no «produce» grano por acción directa: contribuye a procesos que hacen posible la formación y el llenado de estructuras reproductivas, siempre que otros recursos esenciales estén disponibles.

En el frijol común, el dosel establece la capacidad de captar radiación y producir fotosintatos. Los tejidos jóvenes constituyen destinos de carbono y minerales, mientras que las raíces sostienen captación y soporte. Al iniciarse la floración, la distribución cambia porque vainas y granos se convierten en destinos crecientes de asimilados. Un nutriente que

limita la expansión inicial del dosel puede reducir el número de estructuras reproductivas disponibles, aunque posteriormente se corrija su carencia. En cambio, una limitación que aparezca durante el llenado puede alterar la masa final de las semillas sin afectar en la misma proporción el número de vainas. La interacción entre momento del estrés y componente de rendimiento justifica observar varios indicadores y no solo la producción al término de la campaña.

Los procesos fotosintéticos y respiratorios también dependen de factores ajenos a la disponibilidad mineral. Temperatura, intensidad de radiación, disponibilidad de agua, aireación del suelo y sanidad de las hojas afectan la oferta de energía y la demanda de asimilados. Una deficiencia nutricional puede parecerse fenotípicamente a otros estreses; a su vez, una planta bien fertilizada puede exhibir bajo rendimiento cuando la etapa reproductiva coincide con un episodio desfavorable. La inferencia causal exige reconocer que la fertilización opera dentro de esta red. Los estudios de Coelho et al. (2024) y Smith et al. (2022), desarrollados bajo interacciones entre nutrición y disponibilidad hídrica, muestran la utilidad de examinar más de un factor y de distinguir mecanismos antes de extrapolar dosis entre ambientes.

Desde una perspectiva biofísica, la adquisición de nutrientes implica transporte por flujo de masa, difusión y contacto radical. El movimiento del agua aproxima solutos móviles a la superficie de la raíz, mientras que la difusión responde a gradientes locales de concentración. Si la humedad disminuye, la conectividad de las películas de agua en el suelo cambia y los iones pueden desplazarse con mayor dificultad; si el suelo se satura, la reducción del oxígeno disponible modifica respiración radical y procesos microbianos. Ninguna cantidad de fertilizante asegura absorción efectiva si la interfaz suelo-raíz ha perdido capacidad funcional. Esta constatación es especialmente relevante para comparar campañas con diferentes distribuciones de lluvia, aun cuando sus totales estacionales resulten semejantes.

La demanda de nutrientes y el potencial de captación no avanzan siempre al mismo ritmo. Una raíz puede ser extensa pero poco activa por temperatura adversa, salinidad o falta de oxígeno; un sistema radical relativamente reducido puede sostener una captación suficiente si explora zonas ricas en nutrientes y dispone de humedad. La arquitectura importa, pero también los transportadores de membrana, los exudados radicales, la asociación con

microorganismos y el balance de carbono destinado al subsuelo. Chen et al. (2023) enfatizan la plasticidad de la arquitectura radical frente a baja disponibilidad de fósforo. La consecuencia agronómica es que una recomendación no debería descansar en la concentración química aislada del fertilizante: necesita dialogar con los rasgos de la variedad y con la estructura física del suelo.

Balances de nitrógeno y funcionamiento de la simbiosis

El nitrógeno del sistema agrícola procede de diversas fuentes: reservas minerales del suelo, mineralización de materia orgánica, fertilizantes incorporados, aportes atmosféricos y, cuando se establecen las condiciones adecuadas, fijación biológica. Esas vías no son intercambiables en costo, oportunidad ni impacto ambiental. La planta puede absorber nitrato o amonio procedente de fertilización y transformación edáfica, mientras que la fijación simbiótica aporta nitrógeno reducido mediante una relación metabólica con microorganismos. El balance útil distingue entradas, extracción por la cosecha, acumulación en residuos, pérdidas y variación de reservas. Sin tal balance, un incremento en rendimiento no permite calcular cuánto nitrógeno utilizó la planta ni qué porcentaje provino del fertilizante.

La nodulación constituye una secuencia biológica regulada. Las señales químicas entre hospedero y bacteria preceden a la formación de estructuras especializadas, y el nódulo funcional requiere suministro de carbono y un ambiente bioquímico adecuado. La nitrogenasa, enzima involucrada en la fijación, es sensible al oxígeno, pero la respiración asociada requiere energía; el nódulo debe sostener un equilibrio complejo. Sequía, salinidad, temperatura y condiciones del suelo pueden alterar esa organización. El hecho de que una planta pertenezca a la familia de las leguminosas no demuestra que todos sus nódulos estén activos o que estos aporten una cantidad agronómicamente suficiente de nitrógeno.

La disponibilidad de nitrógeno mineral puede actuar sobre el crecimiento inicial y sobre la inversión vegetal en la simbiosis. En suelos de baja oferta, un suministro moderado puede favorecer el establecimiento, pero aumentos posteriores no garantizan ganancias proporcionales porque la relación con rizobios y los costos fisiológicos pueden modificarse. Las implicaciones no deben expresarse como una regla única: los genotipos difieren en potencial de fijación, los suelos en sus comunidades microbianas y los sistemas de cultivo en sus restricciones. Reinprecht et al. (2020) ofrecen evidencia experimental sobre interacciones

entre suministro nitrogenado y fijación en frijol. Para vincular ese marco con Cajabamba, sería indispensable medir nódulos y fuentes de nitrógeno: la tesis no presenta esas mediciones.

La disponibilidad de fósforo se relaciona con la simbiosis por el requerimiento energético de la fijación. Cuando la planta enfrenta restricción fosfatada, la adquisición y utilización del nitrógeno pueden limitarse indirectamente. Esto explica por qué un resultado atribuido a «NPK» no puede traducirse sin pruebas a una contribución separada del nitrógeno. La presencia simultánea de distintos nutrientes en un paquete experimental impide establecer qué factor liberó la restricción primaria; incluso es posible que la respuesta surja de complementariedades entre disponibilidad fosfatada y actividad de la simbiosis. En términos de diseño, un factorial o un conjunto de tratamientos que varíe nutrientes por separado permitiría explorar esos mecanismos, sin confundir una nueva propuesta experimental con resultados ya existentes.

Los biofertilizantes deben evaluarse mediante identidad de la cepa, compatibilidad con el hospedero, supervivencia, modo de aplicación y trazabilidad del producto. La mera etiqueta de un inoculante no garantiza su viabilidad. Una investigación comparativa necesita un control sin inoculación, condiciones homogéneas de suelo y manejo, y variables que permitan distinguir colonización de rendimiento final. Los trabajos de Gatabazi et al. (2024) y Reis et al. (2023) sitúan estas herramientas dentro de la discusión contemporánea sobre fuentes alternativas de nutrientes. Sin embargo, la promesa de ahorro en fertilizante mineral requiere presupuesto parcial, evaluación local y replicación; no puede derivarse automáticamente de la existencia de efectos positivos en otro territorio.

La resiliencia microbiana es otra variable de interés. Un sistema puede presentar buen desempeño en un año con humedad adecuada y perder capacidad simbiótica en una temporada seca. Da Silva et al. (2024) examinaron la respuesta de nódulos a la sequía a nivel molecular y aportaron evidencia de que el estrés modifica procesos internos relevantes. Estos hallazgos abren hipótesis verificables sobre sensibilidad varietal y manejo hídrico, pero no autorizan inferir valores de fijación biológica para un ensayo que solo midió componentes del rendimiento. La ciencia aplicada progresa cuando mantiene visible la frontera entre una explicación plausible y un mecanismo observado.

Disponibilidad de fósforo y estrategias de exploración radical

El fósforo plantea una paradoja agronómica: puede estar presente en cantidades totales apreciables y, aun así, resultar escaso en la solución del suelo. Las reacciones de adsorción sobre superficies minerales, precipitación y transformaciones biológicas modulan su disponibilidad. El pH, la mineralogía y la materia orgánica alteran esas rutas, por lo que dos suelos con un mismo valor analítico aislado no necesariamente ofrecerán al cultivo un suministro equivalente. La interpretación requiere considerar el método de extracción utilizado por el laboratorio y la calibración local entre ese resultado y la respuesta de cultivos. Una cifra de fósforo «bajo» sin método y umbrales reconocibles orienta la pregunta, pero no constituye una dosis exacta de corrección.

La inmovilidad relativa del fosfato confiere importancia al volumen de suelo explorado. Las raíces finas y pelos radicales incrementan superficie de contacto, mientras que la ramificación y los ángulos de crecimiento definen qué horizontes se aprovechan. En presencia de una fuente localizada, las raíces que exploran su cercanía pueden captar una fracción mayor que las alejadas. La decisión entre aplicación al voleo y localizada debe equilibrar uniformidad, eficiencia, riesgo para plántulas y capacidad operativa. Ninguna técnica supera universalmente a todas las demás, ya que sus efectos dependen de humedad, fuente, profundidad y distribución de raíces. Chen et al. (2023) sitúan estos rasgos dentro de la búsqueda de genotipos con mejor captación fosfatada.

Conviene diferenciar «eficiencia de adquisición» de «eficiencia de utilización». La primera refiere a la capacidad de obtener fósforo del ambiente; la segunda, a cuánto crecimiento o grano se genera por unidad de nutriente incorporada al sistema vegetal. Un material genético puede compensar una baja captación mediante uso interno eficiente y otro puede ser excelente captador pero distribuir menos asimilados a grano bajo ciertas condiciones. Para cuantificar estas características se requieren mediciones adicionales de biomasa y concentración tisular. Las variables originales de Cajabamba no incluyen esos datos; el libro emplea estos conceptos como ampliación interpretativa, no como resultados medidos en la variedad Cápsula.

La carencia simultánea de agua y fósforo puede generar restricciones más intensas que cualquiera de las dos aislada. La sequía altera crecimiento y difusión, y el bajo fósforo afecta procesos energéticos y establecimiento; su combinación puede disminuir desarrollo y productividad. Smith et al. (2022) exploraron este tipo de respuesta en frijol mediante un

diseño que consideró ambas limitaciones. Trasladar esas conclusiones a una parcela andina exige verificar condiciones de suelo y clima, pero ayuda a formular una pregunta concreta: ¿la respuesta atribuida a la fertilización sería similar si se repitiera la campaña bajo déficit hídrico? La tesis de Cajabamba no contiene repetición multianual que resuelva ese interrogante.

La fertilización fosfatada también tiene una dimensión temporal que excede una campaña. Parte del nutriente incorporado puede permanecer en fracciones edáficas, mientras otra parte es retirada con la cosecha o movilizada en procesos ambientales. La decisión debe revisar la historia de aplicaciones y la evolución analítica del suelo; repetir cada año una dosis establecida para una condición inicial puede aumentar costos o mantener una deficiencia si las condiciones han cambiado. El seguimiento de fertilidad permite construir un balance aproximado de aportes y extracciones, aunque su exactitud depende de registrar dosis, rendimientos, pérdidas y retornos de residuos. Esta perspectiva vincula nutrición de la planta con conservación de la capacidad productiva del agroecosistema.

El potasio más allá de un componente de la fórmula

El potasio participa en regulación osmótica, activación enzimática y funcionamiento de células que controlan intercambio gaseoso. Su importancia no equivale a afirmar que toda aplicación adicional produzca más resistencia al estrés. La respuesta depende de disponibilidad previa, relación con otros cationes, demanda de la variedad y severidad ambiental. Un suelo con potasio suficientemente disponible puede no ofrecer respuesta económicamente útil a un incremento de fertilización, mientras otro con reservas insuficientes podría limitar expansión y llenado de grano. La prioridad analítica consiste en reconocer el estado del suelo y la respuesta probable, no en maximizar una sola concentración.

La dinámica del potasio incluye solución del suelo, sitios de intercambio catiónico y reservas minerales con distinta velocidad de liberación. Su disponibilidad puede cambiar durante períodos húmedos y secos, y una prueba de laboratorio representa una aproximación condicionada por el método. Los suelos de texturas diferentes difieren en capacidad de intercambio y retención; por ello el manejo de una fuente potásica no debería copiarse entre parcelas sin considerar propiedades químicas y físicas. La aplicación de cloruro de potasio, registrada en el estudio original, constituye un hecho histórico del ensayo, pero su pertinencia

en otros lotes depende además de calidad de agua, salinidad y sensibilidad del sistema a acumulación de cloruros.

La relación entre potasio y agua puede analizarse mediante la regulación de la apertura estomática y el mantenimiento del equilibrio iónico. Sin embargo, la tolerancia a sequía constituye un rasgo complejo que involucra raíces, regulación hormonal, fotosíntesis, reservas de carbohidratos y duración del estrés. No hay base para atribuir la diferencia entre tratamientos de Cajabamba a un «efecto antiestrés» del potasio, porque el diseño no separó nutrientes ni midió procesos fisiológicos específicos. En una investigación futura, registrar humedad del suelo, conductancia estomática y contenido foliar de K permitiría evaluar hipótesis más precisas sobre la interacción nutrición–agua.

El potasio también interactúa con calcio y magnesio. Altas concentraciones relativas de un catión pueden modificar la absorción de otros por competencia y por propiedades de la solución del suelo, lo que obliga a pensar en balances, no en cantidades independientes. Un informe de fertilidad que muestre cifras individuales sin considerar reacción del suelo, intercambio y síntomas del cultivo resulta insuficiente para explicar todas las restricciones. El objetivo operativo es sostener una nutrición que funcione durante todo el ciclo, con el menor uso innecesario de insumos compatible con productividad, rentabilidad y conservación de recursos.

Interpretar una respuesta combinada sin atribuciones indebidas

Cuando tres nutrientes cambian juntos entre tratamientos, el resultado estima el comportamiento de paquetes completos, no el efecto independiente de cada elemento. Así ocurrió en el ensayo de Cajabamba: T1, T2 y T3 se diferenciaron por niveles simultáneamente crecientes de N, P y K, frente a un tratamiento testigo. El diseño permite contrastar esos paquetes en las condiciones evaluadas. No permite descomponer la respuesta en contribuciones porcentuales de nitrógeno, fósforo y potasio ni demostrar interacciones específicas entre pares de nutrientes. El concepto es crucial porque una interpretación fisiológica convincente no sustituye la necesidad de un diseño que identifique el mecanismo propuesto.

La investigación futura podría comenzar con ensayos de omisión de nutrientes. Bajo una base tecnológica común, se compararía un paquete completo con tratamientos que

excluyan un elemento cada vez; la diferencia observada orientaría sobre restricciones funcionales en ese suelo y campaña. Otro enfoque consistiría en variar cada nutriente por separado dentro de un factorial, pero la cantidad de parcelas y los recursos necesarios serían mayores. También cabe realizar una serie de respuesta a una sola dosis crítica mientras los demás nutrientes se sostienen cerca de suficiencia. Cada diseño responde preguntas diferentes y requiere definir de antemano los contrastes prioritarios. Elegir un diseño complejo sin capacidad de ejecutar controles, análisis y replicación podría ser menos útil que una comparación sencilla bien documentada.

La eficiencia agronómica marginal plantea la pregunta de cuánto grano adicional se obtiene al aumentar una dosis. Debe calcularse sobre nutrientes comparables, con unidades y costos explícitos; no basta dividir la producción total por kilogramos de fertilizante. En el caso de tres nutrientes que aumentan conjuntamente, incluso la razón entre incremento de rendimiento e incremento de insumos carece de interpretación elemental única. El mejor promedio observado tampoco equivale necesariamente al óptimo técnico: podría existir una dosis intermedia no evaluada que produzca similar rendimiento, o una dosis menor que maximice beneficio económico. Los promedios publicados muestran que las tres alternativas fertilizadas pertenecieron al mismo grupo de significación de Duncan para rendimiento. Esa información favorece una evaluación económica posterior y desaconseja recomendar la alternativa de mayor promedio como superior estadísticamente a las demás fertilizadas.

La investigación científica transforma observaciones locales en conocimiento útil cuando conserva tres niveles de afirmación. Primero, los hechos directamente registrados, como dosis, tratamientos y rendimientos por parcela. Segundo, las inferencias que el diseño respalda, por ejemplo una diferencia global entre alternativas fertilizadas y testigo bajo las condiciones ensayadas. Tercero, las explicaciones de mecanismos que se proponen a partir de teoría y literatura comparativa, pero que exigirían nuevas mediciones. Mantener estas fronteras es una forma de rigor y también de respeto por la inversión que realizará quien utilice el conocimiento para decidir una compra. El capítulo siguiente traduce ese razonamiento fisiológico a un enfoque de diagnóstico de suelo, clima y operaciones de campo.

Modelos de suficiencia y respuesta relativa

El concepto de nivel crítico de un nutriente tiene significado cuando se ha definido una relación empírica entre su medición y la respuesta del cultivo. No es una propiedad universal del elemento, sino un umbral operativo que depende de especie, método analítico, suelo y criterio de producción elegido. Una concentración que en un ambiente corresponde a respuesta probable puede no desempeñar el mismo papel en otro con diferente pH, capacidad de intercambio o balance hídrico. Por este motivo, los manuales de interpretación de análisis de suelo se deben utilizar dentro de los dominios para los que fueron calibrados. La clasificación cualitativa del suelo de Cajabamba orienta sobre limitaciones iniciales, pero no permite reconstruir matemáticamente un nivel crítico para la variedad Cápsula.

La respuesta relativa suele expresarse como una proporción de la producción lograda bajo cierta referencia de suficiencia. Esa transformación facilita comparar situaciones con potenciales productivos diferentes, pero requiere definir correctamente el rendimiento de referencia y comprobar que el máximo estimado resulta creíble. En un experimento con varias dosis conjuntas de NPK, calcular una respuesta relativa al mayor promedio observado no transforma automáticamente ese promedio en un máximo fisiológico. El experimento no cubre todas las combinaciones posibles ni repite el cultivo bajo todas las restricciones relevantes. La aparente precisión del porcentaje no debe confundirse con la precisión del conocimiento causal.

Los modelos de rendimiento han utilizado funciones de saturación, respuestas cuadráticas, plateaus y relaciones más complejas para vincular nutrientes y producción. Elegir un modelo exige considerar el diseño, la dispersión y el mecanismo biológico plausible. Una función puede ajustar los puntos experimentales y resultar inapropiada fuera de ellos. Además, cuando varios nutrientes covarían, cualquier curva unidimensional representa una trayectoria dentro de un espacio de dosis más amplio y no identifica contribuciones aisladas. La investigación aplicada debe formular primero qué variable se pretende optimizar, después elegir tratamientos capaces de identificar su relación con la respuesta y finalmente ajustar el modelo bajo supuestos explícitos.

La noción de suficiencia también tiene una dimensión dinámica. Un tejido puede mostrar concentración adecuada en una fecha y, aun así, atravesar una deficiencia transitoria durante otra fase. El monitoreo foliar seriado puede aportar información, pero exige protocolos de muestreo comparables por edad y posición de hoja. La concentración tisular

puede variar por un efecto de dilución cuando la planta crece rápidamente; por ello, interpretar aumentos o descensos requiere observar simultáneamente biomasa y desarrollo. La tesis no presenta una serie de análisis foliares y el libro no la inventa. Su inclusión en la agenda futura sirve para aproximar los mecanismos que los resultados de cosecha dejan sin resolver.

Pérdidas y eficiencia en el destino del nutriente

La eficiencia de un programa mineral no se reduce a la fracción absorbida. Una proporción del fertilizante puede inmovilizarse temporalmente en la matriz del suelo, incorporarse a biomasa microbiana, transformarse químicamente o salir del sistema mediante procesos ambientales. La magnitud depende del elemento, la fuente y las condiciones locales. Las pérdidas potenciales tienen relevancia económica, pues representan insumos que no contribuyeron al objetivo inmediato, y pueden adquirir relevancia ambiental cuando afectan agua o atmósfera. Cuantificarlas requiere mediciones apropiadas; ni el rendimiento ni el análisis de suelo aislado bastan para reconstruir todos los flujos.

El nitrógeno presenta rutas de transformación microbiana y movimientos asociados al agua que obligan a evaluar oportunidad de aplicación. El fósforo suele presentar restricciones por sorción y transporte en partículas erosionadas, mientras que el potasio interactúa con intercambio catiónico, fijación mineral y extracción por cosecha. No conviene equiparar sus riesgos ni su permanencia. Las estrategias de eficiencia pueden incluir dosis ajustadas, mejor momento de aplicación, colocación y seguimiento del cultivo. Sin embargo, el mejor procedimiento se determina por evidencia en cada sistema y no únicamente por la categoría comercial del fertilizante.

El concepto de recuperación aparente requiere comparar absorción de nutrientes en plantas fertilizadas y no fertilizadas, además de conocer lo aplicado. Como el ensayo de Cajabamba no documenta concentración mineral de la biomasa ni extracción total, no es posible calcularla con sus datos primarios. Algo semejante ocurre con la eficiencia fisiológica, que compara producción adicional con cambios en absorción. Mantener claros los datos exigidos por cada indicador evita publicar cifras de apariencia especializada pero sin sustento. Lo que sí admite el conjunto de resultados es una comparación transparente de producción por área entre paquetes y un análisis de sus implicaciones prácticas sujeto a las incertidumbres expuestas.

El segundo capítulo muestra que la fertilización de frijol es un problema biológico de adquisición, transformación y sincronía. Los tres macronutrientes interactúan entre sí y con la simbiosis y el ambiente; por ello, una respuesta local a paquetes completos necesita integrarse con información del suelo y del agua. El capítulo siguiente traslada estos mecanismos a las decisiones operativas del manejo agronómico y a las condiciones que determinan su eficiencia.

CAPÍTULO III

SUELO, AGUA Y ESTRATEGIAS DE MANEJO DE FERTILIZACIÓN

Una recomendación de fertilización se convierte en una práctica agrícola únicamente cuando se traduce en decisiones sobre suelo, semilla, fuente, momento, ubicación y agua. El producto comercial es la parte visible de una secuencia mayor que empieza con el diagnóstico y termina con la evaluación. En sistemas de pequeña agricultura esa secuencia se enfrenta a diferencias edáficas, calendario de labores, acceso a insumos y variabilidad meteorológica. Este capítulo organiza el manejo como un proceso de toma de decisiones revisable y sustentado en evidencia, no como una lista fija de operaciones.

3.1. El suelo como regulador de disponibilidad y respuesta

La fertilidad se entiende mejor como una propiedad dinámica que como una reserva inmóvil. Los nutrientes pueden encontrarse en solución, asociados a superficies de intercambio, formando minerales o integrando materia orgánica. No toda fracción del inventario químico se vuelve accesible al mismo ritmo. La actividad microbiana, la temperatura, el contenido de agua y el estado de agregación del suelo influyen sobre los flujos entre compartimentos. Esta perspectiva explica por qué dos parcelas con cantidades totales semejantes pueden presentar respuestas distintas a una misma aplicación. Havlin et al. (2014) enfatizan el papel integrado de las propiedades del suelo y el manejo en la disponibilidad de nutrientes.

La textura condiciona tanto la dinámica del agua como el intercambio de iones. Los suelos con mayor proporción de arena suelen presentar otro comportamiento de infiltración y retención que los ricos en arcilla, aunque la estructura, materia orgánica y profundidad efectiva pueden modificar ampliamente esas tendencias. La densidad, el grado de compactación y los horizontes restrictivos determinan el volumen explorable por las raíces. Un diagnóstico que registre solo el nombre textural pierde información relevante; además, la

toma de una muestra compuesta puede representar adecuadamente la fertilidad promedio para ciertos propósitos, pero no revela por sí sola toda la heterogeneidad existente entre parcelas.

El pH incide en transformaciones y solubilidad de elementos, pero debe interpretarse con cautela. Un valor de pH puede ayudar a explicar restricciones químicas, aun cuando no identifique de manera aislada qué nutriente controla el rendimiento. En suelos ácidos algunas formas de fósforo pueden quedar asociadas a componentes de hierro y aluminio; en otros ambientes intervienen procesos ligados al calcio. Las decisiones de enmienda requieren análisis, porque modificar la reacción del suelo sin conocer la causa de un problema podría crear limitaciones nuevas o costos evitables. El manuscrito de Cajabamba usa una clasificación cualitativa de reacción «normal»; no aporta en la sección principal un conjunto numérico completo que permita recomendar enmiendas específicas.

La materia orgánica interviene en la estabilidad estructural, en procesos biológicos y en la dinámica de varios nutrientes. Su manejo debe relacionarse con rotaciones, residuos y condiciones de descomposición. Devolver rastrojos o incorporar abonos orgánicos puede ser una práctica con efectos múltiples, pero la composición y mineralización del material varían, de modo que una tonelada de material orgánico no equivale automáticamente a una cantidad fija de NPK disponible. En comparaciones de largo plazo conviene registrar calidad y dosis efectiva del material incorporado, así como el momento en que su fracción mineral puede contribuir a la demanda del cultivo.

El muestreo de suelo representa la primera decisión estadística del manejo. La profundidad, el número de submuestras, la ruta de recolección y las condiciones de conservación afectan la utilidad analítica. El documento original refiere un recorrido en zigzag, extracción hasta 40 cm, mezcla de submuestras y envío de una muestra representativa al laboratorio. Esta descripción permite conocer la lógica de obtención de material; sin embargo, la versión disponible no incluye en el cuerpo una tabla completa de concentraciones y métodos para cada nutriente. La comparación con ensayos de calibración exige, por tanto, reconocer ese límite de información (Pantoja Medina et al., 2026a).

3.2. Diagnóstico integrado de agua y clima

El agua transporta nutrientes hacia las raíces, participa en reacciones metabólicas y sostiene el intercambio gaseoso necesario para la fotosíntesis. Su presencia, sin embargo,

también debe situarse dentro de rangos favorables: el déficit reduce crecimiento y absorción, mientras el exceso puede limitar oxigenación radical y favorecer ciertas enfermedades. La disponibilidad no se resume en precipitación acumulada; interesa la distribución temporal, el almacenamiento del suelo, la profundidad radical y la coincidencia de eventos críticos con floración y llenado de grano. Las condiciones climáticas actúan, por tanto, como parte del tratamiento agronómico observado, aunque no siempre hayan sido manipuladas experimentalmente.

La sensibilidad al déficit varía con la etapa fenológica y el genotipo. Una pérdida de agua durante expansión foliar puede reducir la futura capacidad de interceptar radiación; durante el establecimiento reproductivo, puede afectar retención de flores y vainas; durante llenado de semilla, puede modificar masa final de grano. Smith et al. (2022) mostraron que bajo fósforo y déficit de agua pueden coincidir reducciones severas de biomasa y rendimiento en frijol. No hay una traducción automática de sus magnitudes al sistema de Cajabamba, pero el principio de interacción justifica que las nuevas evaluaciones de fertilización incorporen información hídrica suficiente.

Coelho et al. (2024) analizaron la dinámica de absorción de N, P y K bajo diferentes intensidades de déficit hídrico y con dos cultivares contrastantes. Su trabajo ilustra que no es idéntico estudiar cantidad aplicada, cantidad absorbida y momento de mayor demanda. Una estrategia de fertilización puede fallar si el nutriente se incorpora cuando las raíces no disponen de humedad o si el suministro disminuye precisamente cuando la planta presenta máxima necesidad. Por ello, la programación de aplicaciones debe acompañarse de una evaluación práctica del agua, especialmente en suelos de montaña donde la reserva utilizable puede variar entre sectores.

La temperatura modifica procesos celulares, velocidad de desarrollo y actividad microbiana. Los períodos de calor extremo pueden afectar la reproducción; temperaturas bajas pueden retrasar emergencia o actividad metabólica. La calidad de un análisis climático depende de series confiables y de diferencias entre temperatura media, máxima y mínima. El documento de origen ofrece datos mensuales de enero a abril para temperatura y humedad relativa, pero no permite establecer sin ambigüedad el año al que corresponden todas las observaciones. En el capítulo de caso se reproducen los registros sin atribuirles una fecha no documentada.

En la operación de campo, el riego por gravedad exige atención a uniformidad de distribución, infiltración y posible escorrentía. Una parcela al inicio del surco puede recibir condiciones distintas de otra situada más lejos si no se controla adecuadamente la aplicación. El manuscrito registra que los riegos se efectuaron de acuerdo con las necesidades de las plantas, pero no presenta láminas ni volúmenes por tratamiento. Por eso no es posible calcular productividad del agua ni inferir equivalencia hídrica con ensayos que utilizan riego por goteo, porcentajes de evapotranspiración o niveles de humedad controlados. La calidad de la comparación depende de no rellenar esos vacíos.

Tabla 6. Condiciones meteorológicas descritas para el ensayo

Mes	Máxima (°C)	Mínima (°C)	Promedio (°C)	Humedad relativa (%)
Enero	23,55	14,97	19,26	54,55
Febrero	20,94	14,15	17,54	56,55
Marzo	21,83	15,30	18,56	59,37
Abril	22,23	15,33	18,78	56,73

Fuente: Pantoja Medina et al. (2026), manuscrito académico proporcionado; transcripción fiel de las cifras reportadas.

3.3. Fuentes de fertilización, formulación y momento de aplicación

Un programa de fertilización debe separar tres conceptos: nutriente requerido, fertilizante comercial seleccionado y cantidad de producto aplicado. La urea contiene nitrógeno, el superfosfato triple aporta fósforo expresado comercialmente como óxido y el cloruro de potasio aporta potasio expresado como equivalente de óxido. Las etiquetas y conversiones deben documentarse para evitar que un valor como «40–80–40» se interprete de manera equivocada. En agronomía, las fórmulas N-P-K suelen expresarse sobre bases convencionales, pero el cuadro de origen no imprime explícitamente las unidades y bases de sus encabezados; la obra conserva esa ambigüedad y no la reemplaza por una conjetura.

La selección de la fuente influye en concentración, comportamiento químico, facilidad de aplicación y costo de transporte. Dos productos que aportan el mismo nutriente no necesariamente presentan idéntica reacción en el suelo, acompañantes químicos o facilidad de distribución. Cuando el material disponible se compra en sacos y se fracciona para parcelas pequeñas, la precisión de pesaje es particularmente importante. Un error de escala puede generar diferencias apreciables en la cantidad incorporada por unidad

experimental. La trazabilidad exige guardar las cantidades efectivamente usadas y no limitarse a indicar dosis teóricas.

El fraccionamiento temporal reconoce que nutrientes y procesos de absorción tienen dinámica. En el ensayo original se aplicaron fósforo, potasio y la mitad del nitrógeno al momento de la siembra, reservando la otra mitad del nitrógeno para el cambio de surco. Ese procedimiento constituye un dato de manejo del caso, no una recomendación de aplicación general. El fraccionamiento puede tener razones agronómicas, pero su conveniencia depende de la oportunidad de suministro, del régimen de humedad y de las posibilidades operativas. La fertilización que se realiza tarde o sobre suelo seco puede ofrecer una respuesta diferente de la prevista.

La colocación espacial afecta el contacto entre nutrientes y raíces y la concentración localizada alrededor de semillas jóvenes. Algunas estrategias acercan el fertilizante a la zona de establecimiento; otras buscan una distribución más amplia. La decisión depende de fuente, dosis, textura y condiciones de humedad. Debe evitarse convertir una técnica particular en regla sin evaluar riesgos de daño localizado, volatilización o transporte superficial. En un ensayo diseñado para comparar dosis, idealmente la colocación y el calendario deben mantenerse constantes entre tratamientos, de manera que la diferencia principal corresponda al factor investigado.

El registro de labores constituye parte de la validez de campo. Si un tratamiento recibe una modificación de riego, una fecha distinta de control sanitario o una densidad diferente, se introducen posibles factores de confusión. Los cuadernos de campo pueden recoger fecha, operador, insumo, lote, cantidad, condiciones meteorológicas y anomalías. Aunque la matriz técnica de una campaña sea sencilla, su documentación permite explicar resultados atípicos y facilita la repetición. El documento de origen señala el uso de una libreta de campo; no incluye la totalidad de sus anotaciones, por lo que la obra no presupone condiciones de uniformidad que no se pueden comprobar directamente.

Tabla 7. Factores de manejo observados y oportunidades de medición

Proceso	Documento de origen	Medición que fortalecería un nuevo ensayo
Semilla	Semilla certificada e inocuidad preventiva	Lote, pureza y tasa de germinación documentados.
Suelo	Muestra compuesta y análisis físico-químico	Valores numéricos con método y profundidad.
Fertilización	Urea, superfosfato triple y KCl	Registro por parcela y momento.
Agua	Riego por gravedad según necesidad	Lámina, frecuencia y agua almacenada.
Sanidad	Control preventivo	Incidencia y severidad de daños.

Fuente: Elaboración editorial propia, sustentada en las fuentes científicas citadas en los apartados correspondientes; categorías analíticas, no mediciones de campo.

3.4. La salud del cultivo y el manejo integrado

Los nutrientes no actúan en un organismo aislado. Las plantas compiten con malezas por luz, agua y recursos del suelo; pueden sufrir daño por insectos o patógenos; y responden a la densidad con cambios de arquitectura, disponibilidad de luz y distribución de la producción por individuo. Por esta razón, un manejo que mejora la nutrición puede no traducirse en mayor cosecha cuando otros factores se vuelven dominantes. La evaluación del rendimiento necesita registrar las principales operaciones y restricciones, aun cuando el experimento se concentre en la fertilización.

El uso de semilla de calidad reduce fuentes de heterogeneidad desde el establecimiento. La viabilidad, homogeneidad y sanidad inicial favorecen un número de plantas cercano al programado, pero no garantizan por sí mismas la ausencia de problemas posteriores. En Cajabamba se utilizó semilla certificada procedente de una estación experimental del INIA y se describió tratamiento previo a la siembra y prueba de germinación (Pantoja Medina et al., 2026a). Esa información es pertinente para comprender la conducción del ensayo; la fuente no permite determinar la eficacia específica del producto fitosanitario utilizado ni justificar su recomendación actual sin revisar normativa y evidencia vigentes.

La densidad se define por semilla sembrada, emergencia y supervivencia. Una misma cantidad de semillas por golpe puede producir diferentes números de plantas cosechables si varían germinación, daño inicial o manejo posterior. El rendimiento por planta debe interpretarse junto con el rendimiento por superficie, porque una mayor producción individual podría coexistir con menor densidad final. El manuscrito especifica tres semillas

por golpe, separaciones entre surcos y golpes y 156 plantas por parcela como población de diseño. No ofrece una trayectoria completa de mortalidad por fecha, de modo que el dato de población no equivale a una serie observada de establecimiento y supervivencia.

El control de malezas y el riego se ejecutaron mediante prácticas registradas por los autores. Para trasladar resultados a otras fincas sería necesario conocer el momento y eficacia de dichas operaciones, porque la competencia o el estrés transitorio pueden interactuar con el aprovechamiento de los fertilizantes. Un programa de extensión que solo comunique la dosis y omita la preparación del terreno, la semilla, la oportunidad de deshierbo y el manejo hídrico corre el riesgo de atribuir al fertilizante un poder que depende de todo el sistema. La tecnología recomendada es el conjunto coherente de procesos, no solo un insumo.

La integración no implica agregar intervenciones indiscriminadamente. Cada práctica tiene costos, riesgos y condiciones de pertinencia. Aplicar un producto por prevención sistemática sin evidencia de necesidad puede generar gastos y problemas ambientales; corregir con fertilizante un síntoma que en realidad es sanitario puede producir una respuesta decepcionante. El asesoramiento moderno se apoya en observación diagnóstica, umbrales pertinentes y seguimiento. En el marco del libro, estas recomendaciones se presentan como principios de buena evaluación, no como reconstrucción de medidas que el equipo original haya aplicado de forma no documentada.

3.5. Del diagnóstico al protocolo y del protocolo al aprendizaje

El concepto de manejo adaptativo parte de una premisa: una recomendación debe poder revisarse a la luz de los resultados. En vez de copiar una dosis histórica como verdad cerrada, se identifica la limitación probable, se documenta la condición inicial, se implementa una comparación y se evalúa el efecto. Si el tratamiento no responde, la pregunta no es solo si se cometió un error de aplicación; también interesa si la hipótesis de limitación era correcta o si otro factor controló el rendimiento. Este enfoque convierte la extensión en una actividad de aprendizaje contrastable.

Las recomendaciones nutricionales pueden representarse mediante una cadena de evidencias: análisis de suelo, historia de manejo, estimación de requerimientos, elección de fuente, protocolo de aplicación, indicadores del cultivo y balance económico. Cada eslabón responde una pregunta distinta. El análisis de suelo no mide automáticamente absorción; la

apariencia foliar no cuantifica cosecha; el rendimiento no estima por sí mismo rentabilidad. Un buen informe técnico deja visible qué información respalda cada decisión y cuál es la incertidumbre restante. Esta precisión evita la falsa sensación de certeza que producen las recetas escritas con números exactos pero sin diagnóstico.

El productor necesita escenarios prácticos. En un suelo con limitaciones de fósforo, quizá convenga probar corrección específica; en otro con problemas hídricos, asegurar agua en etapas sensibles; en un sistema donde la simbiosis es deficiente, evaluar inoculación compatible; en una finca con buena disponibilidad de nutrientes, evitar aplicaciones marginales que aumenten gasto sin retorno. Son hipótesis de intervención, no recomendaciones derivadas automáticamente del experimento de Cajabamba. La elección exige contrastar la restricción dominante y la evidencia local antes de invertir.

La evaluación económica se integra desde el diseño. Aunque una dosis produzca más grano, su beneficio neto dependerá del precio recibido por el incremento, del costo adicional del fertilizante, transporte, mano de obra, crédito y riesgo. Kassa y Kifle (2023) ilustran el uso de presupuestos parciales para discriminar alternativas fertilizantes en otro ambiente; la FAO (2024) amplía el horizonte al recordar que también existen implicaciones ambientales y sociales relevantes. El trabajo aplicado puede adoptar distintos niveles de análisis, pero debe evitar presentar como resultado económico lo que únicamente fue medido en unidades físicas.

Tabla 8. Secuencia de decisiones para un manejo nutricional responsable

Paso	Información imprescindible	Producto de la decisión
Diagnóstico	Suelo, historia y cultivar	Hipótesis nutricional específica.
Plan	Dosis, fuente, fraccionamiento	Protocolo explícito y verificable.
Ejecución	Fechas, posición y condiciones de aplicación	Trazabilidad de operaciones.
Seguimiento	Vigor, humedad, sanidad y síntomas	Corrección oportuna de manejo.
Evaluación	Rendimiento, costos, calidad de grano	Recomendación local condicionada.

Fuente: Elaboración editorial propia, sustentada en las fuentes científicas citadas en los apartados correspondientes; categorías analíticas, no mediciones de campo.

Tabla 9. Matriz de riesgo para la adopción de dosis comerciales

Riesgo	Manifestación probable	Respuesta razonable
Precio de insumos	Aumento del costo por campaña	Presupuesto parcial previo.
Agua limitante	Menor retorno a nutrientes aplicados	Programación conjunta agua-nutrición.
Salinidad / cloruros	Acumulación no deseada según suelo y agua	Análisis y selección de fuente.
Reacción del suelo	Bloqueo de elementos disponibles	Enmienda justificada técnicamente.
Diversidad genética	Cambios en respuesta varietal	Ensayos con material local.
Variabilidad de campaña	Incertidumbre del beneficio	Validación multianual y análisis de riesgo.

Fuente: Elaboración editorial propia, sustentada en las fuentes científicas citadas en los apartados correspondientes; categorías analíticas, no mediciones de campo.

El diagnóstico de fertilidad como proceso de decisión

Un análisis de suelo no es una orden de fertilizar, sino una medición que necesita contexto. Su valor se interpreta a la luz del método empleado, el momento de muestreo, la profundidad, la variación dentro del lote y la relación histórica entre disponibilidad y respuesta del cultivo. En estudios experimentales, su primera función es caracterizar el ambiente en el que se compararon los tratamientos. En manejo comercial, ayuda a anticipar restricciones y a seleccionar prácticas. Si el laboratorio reporta fósforo como bajo, el profesional debe preguntarse cuál fue el extractante y si el umbral utilizado ha sido calibrado para ese grupo de suelos y plantas. Sin esa información no se debe derivar directamente una dosis en unidades de producto comercial.

La representatividad de la muestra depende de dónde y cómo se obtienen las submuestras. Un terreno con variación por pendiente, historia de fertilización o cambios de textura puede requerir subdivisión por zonas homogéneas. Mezclar en una sola bolsa suelos de comportamiento muy diferente produce un promedio que quizá no describe adecuadamente ninguna zona. El muestreo compuesto es útil cuando los puntos proceden de un ambiente relativamente comparable; no sustituye el criterio agronómico para identificar sectores contrastantes. En la fuente original se describió un recorrido en zigzag y una muestra compuesta enviada al laboratorio de Santa Ana, Huancayo. La información permite reconstruir el procedimiento general, pero no cuantificar toda la variabilidad espacial del lote.

La profundidad también modifica la lectura. La concentración de materia orgánica y ciertos nutrientes suele cambiar verticalmente, mientras raíces y humedad exploran un perfil de mayor complejidad que la capa superficial. Para estudiar una aplicación localizada o

procesos de movilidad, puede ser relevante muestrear diferentes horizontes. La selección de profundidad tiene que responder a la pregunta técnica y mantenerse comparable entre campañas. Informes que omiten la profundidad no permiten interpretar adecuadamente cambios en concentraciones, pues una misma masa de nutriente distribuida en capas distintas puede generar números analíticos diferentes. El estudio base menciona la apertura de puntos hasta 40 cm en el proceso de muestreo y características de la capa arable; no ofrece una serie analítica desagregada por profundidades.

Los análisis químicos resultan más útiles cuando se conectan con registros de extracción del cultivo. La cosecha retira nutrientes que se encontraban en suelo, residuos o fertilizantes; una parte permanece en biomasa no exportada. Los balances son aproximaciones y no sustituyen mediciones de pérdidas, pero ayudan a identificar tendencias de agotamiento o acumulación. En parcelas pequeñas, el trabajo de campo debería conservar muestras, protocolos y resultados originales, además de datos sobre fuentes y cantidades incorporadas. Estas prácticas permiten revisar conversiones o recalcular indicadores sin modificar el dato de origen. En un libro científico, registrar qué documento respalda cada afirmación resulta tan importante como exhibir una cifra cuidadosamente formateada.

La materia orgánica interviene en procesos físicos, químicos y biológicos. Contribuye a estabilidad estructural, retención de agua y actividad microbiana, pero sus efectos dependen de calidad, estado de transformación y condiciones del suelo. Recomendar una incorporación indiscriminada en toneladas por hectárea sin caracterizar el material puede introducir incertidumbres nutricionales y sanitarias. La fertilización mineral y el manejo orgánico no constituyen categorías necesariamente excluyentes; ambos pueden integrarse dentro de una estrategia de conservación y abastecimiento. Una investigación que compare estas vías deberá controlar cantidades y composición para evitar atribuir a un tipo de abono resultados causados por diferencias en nutrientes disponibles o materia orgánica añadida.

Agua, calendario y riesgos de extrapolación

El rendimiento depende de cuándo ocurre el agua, no solo de cuánto se acumula. Dos campañas con lluvia estacional similar pueden diferir radicalmente si una presenta sequía durante floración y otra distribuye las precipitaciones de manera favorable. El calendario fenológico es, por tanto, una referencia imprescindible para interpretar temperatura, precipitación, riego y humedad del suelo. Un registro mensual puede describir el contexto

general, pero no identifica eventos diarios que coinciden con etapas críticas. En Cajabamba se consignaron temperaturas y humedad relativa mensuales de enero a abril, pero la fuente no publica una serie diaria completa de riego o precipitación del ensayo. El vacío debe permanecer explícito y convertirse en prioridad para futuros protocolos.

El agua cumple funciones simultáneas como componente metabólico, medio de transporte de nutrientes y regulador del intercambio gaseoso. Una restricción leve puede cambiar asignación de biomasa y crecimiento de raíces; una restricción intensa puede afectar floración, fertilidad y llenado de semilla. El suelo, además, no responde solo por humedad total: la facilidad con la que la planta extrae agua depende de textura, estructura, profundidad y estado de las raíces. Por eso es útil combinar mediciones ambientales con observaciones de la planta. La integración evita atribuir a fertilización lo que puede explicarse por una interacción entre oferta mineral y potencial hídrico.

La saturación temporal constituye otra forma de estrés. En un suelo con drenaje insuficiente, el ingreso de agua puede reducir disponibilidad de oxígeno en poros y alterar la respiración radical. Una aplicación oportuna en suelo bien aireado puede comportarse de manera distinta en una parcela encharcada. Además, condiciones anaeróbicas afectan transformaciones microbianas de nutrientes. La recomendación de riego debe considerar infiltración, escorrentía, capacidad de retención y control de erosión, especialmente en laderas andinas. Un ensayo localizado en una parcela relativamente uniforme no representa automáticamente terrenos de distinta pendiente, manejo o posición topográfica.

Los datos meteorológicos históricos deben acompañarse de una advertencia temporal. Que un documento indique un promedio de temperatura durante determinados meses no equivale a demostrar condiciones iguales hoy. En el tiempo pueden cambiar la variabilidad interanual, el uso del suelo, las instalaciones de riego y la disponibilidad de agua. Para renovar una recomendación sería apropiado consultar series de estaciones oficiales, especificar cobertura espacial y registrar el año de las observaciones. Si la información disponible es limitada, la decisión razonable consiste en caracterizar la incertidumbre y programar seguimiento, en lugar de inventar detalles climáticos que la fuente histórica no proporciona.

La gestión de riesgo climático puede expresarse mediante escenarios, pero estos no deben confundirse con predicciones. Un escenario de agua suficiente, otro de déficit

temprano y otro de déficit reproductivo permiten identificar qué variables medir y qué decisiones considerar. Una evaluación factorial podría probar niveles de nutrición bajo ambientes hídricos controlados, pero exigiría garantizar agua, repeticiones y aleatorización adecuadas. Smith et al. (2022) respaldan científicamente la pertinencia de estudiar restricciones combinadas de fósforo y sequía. Su evidencia no reemplaza experimentos específicos con la variedad Cápsula en ambientes del Marañón.

Traducir una dosis a operaciones verificables

La diferencia entre dosis nutritiva y cantidad de producto comercial es una fuente habitual de errores. Si una etiqueta declara 46 % de nitrógeno, un kilogramo del material contiene aproximadamente 0,46 kilogramos de nitrógeno en la base declarada. Para estimar la cantidad de producto necesaria bajo un objetivo dado, se divide la masa requerida del nutriente por la fracción comercial correspondiente. El cálculo es una operación matemática y no decide si la dosis agronómica es apropiada. En el caso del fósforo y potasio, además, las etiquetas pueden expresarse como equivalentes de P_2O_5 y K_2O; el profesional debe verificar el sistema de unidades antes de combinar valores de documentos distintos.

La planificación de una parcela exige escalar la dosis por superficie. Si un objetivo se expresa por hectárea, la fracción destinada a una parcela puede calcularse multiplicando por su área relativa a 10 000 m². Sin embargo, el área bruta, el área neta de evaluación y el área realmente fertilizada cumplen funciones diferentes. Utilizar el área neta para calcular la dosis de una parcela bruta o convertir la producción sin definir bordes puede introducir sesgos. Los datos de Cajabamba registran parcelas de 9,36 m² y áreas netas de 1,8 m², lo que obliga a no intercambiar esos denominadores al reconstruir el ensayo. El cuadro original contiene una equivalencia de fuentes de fertilizantes por tratamiento que se reproduce sin reetiquetar unidades no expresas.

La secuencia operativa comienza por validar las unidades, identificar el lote, pesar cada fuente y registrar el momento de aplicación. Continúa con la incorporación, el control de uniformidad, la identificación de las parcelas y la anotación de cambios. Cuando se fracciona nitrógeno, conviene anotar la cantidad de cada parcialidad para que la suma coincida con la dosis programada. En investigaciones multilocales debe registrarse también proveedor y lote comercial, pues concentraciones, granulometría y condiciones de

almacenamiento pueden afectar la ejecución. Esta disciplina no garantiza una respuesta positiva, pero sí permite explicar qué se comparó realmente.

El error de aplicación puede tener estructura sistemática o aleatoria. Un equipo mal calibrado puede alterar de manera similar todas las parcelas de un tratamiento; una distribución irregular puede aumentar variación residual. El control estadístico no corrige por sí mismo un error de preparación de mezclas ni recupera el dato que nunca se midió. La prevención exige calibraciones, dobles verificaciones de pesaje y fichas de campo comprensibles. Si aparecen discrepancias entre la tabla de insumos y una descripción narrativa, lo correcto es mantener ambas trazables y decidir posteriormente qué fuente primaria permite reconciliarlas. Reescribir una cifra para hacerla «encajar» destruye información.

Salud del sistema y manejo de competencia

La competencia por recursos establece un límite al beneficio de fertilizar. Un cultivo con malezas intensas puede convertir parte del nutriente agregado en biomasa de especies no deseadas, mientras la planta de interés sigue restringida. La eficiencia de una práctica depende de su sincronización con emergencia y crecimiento. El monitoreo de arvenses debe diferenciar densidad, etapa y competencia efectiva; no todas las presencias son equivalentes en riesgo. Para futuras pruebas en frijol, describir las operaciones de deshierbo con fecha y método permitirá comparar condiciones de manejo y evaluar costos reales.

Las pérdidas por plagas y enfermedades alteran el rendimiento y sus componentes de diferentes maneras. El daño foliar limita captura de energía; enfermedades vasculares o radicales afectan agua y nutrientes; daños de vaina pueden comprometer semilla comercializable. El beneficio de una fertilización puede quedar enmascarado cuando las pérdidas sanitarias dominan. Por este motivo, ensayos de fertilización deberían registrar incidencia y severidad según protocolos apropiados, sin convertir automáticamente cada registro en diagnóstico causal. La inspección y el control integrados requieren información local, identificación confiable del problema y uso de medidas permitidas y justificadas.

La semilla constituye el punto de partida del sistema. Germinación, vigor, sanidad y uniformidad genética influyen en la densidad final y la comparabilidad de parcelas. La tesis menciona semilla certificada de variedad Cápsula y medidas previas a la siembra, hechos que

permiten valorar parte del control de establecimiento. No se registran todas las pruebas de vigor ni la distribución de mortalidad a lo largo del ciclo. Es recomendable que las investigaciones futuras documenten porcentaje de emergencia por parcela y número de plantas cosechadas, pues una diferencia de rendimiento superficial puede relacionarse tanto con producción individual como con densidad final.

La poscosecha también influye en la calidad comercial y la comparación de rendimientos. La humedad del grano, las impurezas y el tiempo hasta el pesaje pueden alterar masa y precio recibido. Si se comparan materiales cosechados con diferentes contenidos de humedad, la diferencia física puede no representar exclusivamente producción de materia seca. Los protocolos más sólidos definen la base de humedad y el procedimiento de ajuste. En el documento original se describe el pesaje del grano mediante balanza de precisión, pero no aparece una certificación completa de humedad de cada muestra. El libro mantiene la unidad reportada y evita convertirla ficticiamente a una base estandarizada.

Manejo adaptativo y articulación entre finca y laboratorio

La aplicación de recomendaciones no debería ser un acto aislado, sino el tramo de un ciclo de aprendizaje. El primer paso consiste en formular una hipótesis concreta sobre la restricción productiva: por ejemplo, oferta insuficiente de un nutriente o oportunidad inadecuada de su aplicación. Luego se seleccionan indicadores que permitirán verificarla. Una comparación de parcelas bien definida puede generar evidencia local; el registro de costos y calidad del grano agrega información útil para decidir la adopción. El seguimiento posterior pregunta si la respuesta se repite, qué condiciones cambiaron y qué riesgos surgieron. Este proceso es más lento que copiar una receta, pero más confiable cuando la economía del productor depende de cada compra.

El intercambio entre productor, laboratorio y asesor es importante porque cada actor observa aspectos diferentes. La persona que conduce la finca conoce variaciones del terreno y problemas frecuentes; el laboratorio ofrece mediciones bajo métodos definidos; el especialista ayuda a interpretar niveles de suficiencia, incertidumbre y alternativas. La calidad de la recomendación depende de una comunicación que evite falsas precisiones. Un reporte que entregue una dosis exacta sin discutir representatividad del suelo o disponibilidad de agua oculta supuestos fundamentales. En cambio, una indicación contextualizada puede priorizar qué falta medir antes de comprometer mayores gastos.

Las parcelas demostrativas sirven para observar prácticas en condiciones locales, pero no necesariamente ofrecen la misma fuerza inferencial que un experimento aleatorizado con replicaciones. Una comparación de dos franjas puede estar afectada por gradientes de fertilidad o agua; su función principal puede ser pedagógica si no existe control estadístico suficiente. Para construir evidencia, conviene distinguir demostración, ensayo exploratorio y experimento confirmatorio. La combinación de estos formatos resulta valiosa cuando se conserva claridad sobre qué preguntas responde cada uno. Los resultados del estudio de Cajabamba proceden de un diseño de bloques con cuatro repeticiones, característica que debe diferenciarse de una recomendación directa no contrastada en otras fincas.

En sistemas agrícolas de pequeña escala, la evaluación del costo de aprendizaje también importa. Repetir una campaña experimental extensa puede exceder recursos individuales; la cooperación entre instituciones, productores y servicios de extensión permite compartir parcelas, análisis y resultados. A cambio, exige acuerdos sobre propiedad de datos, uso de información y atribución de contribuciones. Una red territorial puede registrar protocolos comunes, conservar diferencias locales y aprender de resultados no positivos, evitando publicar solamente las parcelas con mayor rendimiento. La evidencia negativa o neutra es especialmente valiosa para detectar condiciones en las que un fertilizante no compensa su inversión.

El aprendizaje debe concluir en decisiones revisables. Una formulación razonable no es «usar siempre la dosis que obtuvo la mayor media», sino «considerar la respuesta observada como evidencia local y contrastar una alternativa con base en análisis de suelo, disponibilidad hídrica, costos y replicación». De este modo, la ciencia agraria cumple una función práctica sin extender sus afirmaciones más allá del diseño. El siguiente capítulo presenta los criterios estadísticos que sostienen esa prudencia y permiten distinguir diferencias descriptivas, evidencia inferencial y selección económica.

Registro operativo como instrumento científico

La libreta de campo puede convertirse en un sistema de datos reproducible si cada anotación se vincula con una unidad experimental. Conviene asignar códigos estables a las parcelas, identificar los materiales empleados y registrar las operaciones con fecha y responsable. Una anotación sobre riego no debería limitarse a «se regó»: cuanto más cuantitativa sea la información —método, duración, volumen estimado o condición de

humedad—, más posibilidades tendrá el equipo de analizar su relación con diferencias observadas. La estandarización no exige equipamiento sofisticado para cada variable; requiere seleccionar indicadores relevantes y documentar sus métodos.

La calidad de una medición depende de su definición. Contar vainas por planta exige aclarar qué se considera una vaina elegible y en qué estado se observa; contar granos por vaina requiere definir procedimiento de selección; pesar cien granos implica especificar balanza, calibración y humedad cuando corresponda. Estas definiciones reducen discrepancias entre observadores y campañas. La tesis original explica operaciones generales para las cinco variables, lo que constituye un antecedente valioso; futuros ensayos podrían complementar esa explicación con formatos de registro, protocolos de calibración y conservación de muestras, sin afirmar que tales formatos existieron en el estudio histórico.

El procesamiento de datos empieza antes de la estadística. Una tabla bien organizada puede contener una fila por parcela y una columna por variable, acompañada de unidades y campos de identificación. Las celdas vacías requieren distinguir ausencia de medición, pérdida de muestra y valor cero real. La conversión de kilogramos por área neta a kilogramos por hectárea debe verificarse con el denominador correspondiente; idealmente, la hoja de cálculo conserva una columna con la masa original y otra con la conversión, nunca reemplazando la primera. Este diseño permite detectar incompatibilidades como la observada para T3 entre las tablas de Cajabamba.

La documentación también debe registrar criterios de exclusión. Una parcela dañada por un evento imprevisto puede requerir una decisión estadística justificada, pero eliminarla solo porque presenta una producción poco conveniente introduce sesgo. Lo deseable es definir reglas previamente y conservar los valores originales incluso cuando se presenten análisis de sensibilidad. Las conclusiones deberían mostrar si dependen de una observación extraordinaria. En experimentos pequeños, cada parcela tiene peso apreciable, por lo que la transparencia frente a desviaciones es especialmente importante. La integridad del registro protege tanto la comparabilidad científica como la confianza de quienes utilizarán las recomendaciones.

Vincular tecnología con calendario de cultivo

El calendario de labores organiza restricciones que rara vez son simultáneas. Preparación del terreno, siembra, controles de competencia, fertilización de cobertura y cosecha tienen ventanas de oportunidad que dependen de temperatura y humedad. La disponibilidad de mano de obra condiciona la posibilidad de ejecutar un fraccionamiento nutricional; una dosis teóricamente conveniente puede resultar poco práctica si exige una visita imposible durante una fase crítica. La evaluación técnica debería anotar no solo la cantidad de insumo, sino también el número de operaciones necesarias. Ese detalle modifica costo y posibilidad de adopción.

La fertilización al momento de siembra plantea preguntas distintas de la fertilización de cobertura. En el establecimiento, el contacto excesivo entre algunos productos y la semilla puede representar riesgos; en aplicaciones posteriores, deben considerarse cobertura vegetal, humedad del suelo y accesibilidad. Las recomendaciones requieren verificar fuentes y condiciones locales, no reproducir automáticamente un cronograma histórico. El fraccionamiento de nitrógeno de Cajabamba constituye una característica del protocolo descrito y puede servir como punto de comparación, pero su superioridad frente a otros calendarios no fue probada de forma independiente porque el experimento comparó principalmente dosis conjuntas.

La cosecha introduce una ventana de oportunidad adicional. Retrasarla puede exponer el grano a daños o cambios de humedad, mientras adelantarla puede comprometer calidad y masa. Para evaluar un programa fertilizante resulta importante cosechar bajo criterios comparables de madurez y registrar los procedimientos de secado y pesaje. Diferencias en cosecha no controladas pueden aparentar efectos de nutrición. Una propuesta de manejo integrado debe, por ello, cubrir el ciclo completo y no terminar al finalizar la última aplicación del insumo.

Las operaciones descritas convergen en una regla de prudencia productiva: ningún insumo opera fuera del agroecosistema. La fertilización se convierte en una herramienta potente cuando su elección responde a limitaciones reales y cuando la ejecución respeta la fisiología y las condiciones ambientales. Corresponde ahora preguntar cómo demostrar que una diferencia de rendimiento es atribuible a los tratamientos ensayados y qué significa,

estadísticamente, que una combinación destaque en los promedios de una parcela experimental.

CAPÍTULO IV

RENDIMIENTO, EXPERIMENTACIÓN Y DECISIONES AGRONÓMICAS

La evaluación de la fertilización es inseparable del diseño experimental. Un resultado de cosecha pertenece a una parcela, un tiempo y unas condiciones concretas; afirmar que una diferencia se debe al tratamiento requiere controlar, en la medida del diseño, otras fuentes de variación. Los promedios son necesarios pero no suficientes, porque dos valores distintos pueden corresponder a una separación biológicamente interesante sin que la evidencia estadística permita declarar una diferencia concluyente. Este capítulo explica cómo el rendimiento se convierte en objeto medible y cómo esa medición puede respaldar —o limitar— decisiones agronómicas.

4.1. El rendimiento y sus unidades de observación

La producción total de una parcela y el rendimiento por superficie son magnitudes relacionadas pero no idénticas. La primera expresa la masa efectivamente cosechada; el segundo la refiere a una unidad estándar de superficie para facilitar comparación. La extrapolación requiere conocer el área neta y utilizar una conversión dimensional consistente. Una parcela neta pequeña puede permitir una medición precisa, pero el paso a hectáreas amplifica las cifras: por eso cobran importancia el pesaje, la humedad del grano, la delimitación de bordes y el tratamiento de pérdidas. La unidad «kg/ha» no garantiza comparabilidad si los criterios de cosecha o humedad varían entre estudios.

Las parcelas deben distinguirse de las plantas muestreadas. Cuando un tratamiento se asigna a la parcela, esta constituye la unidad experimental de la inferencia, aunque dentro de ella se observen diez o treinta plantas. Tratar cada planta como una repetición independiente del fertilizante produciría pseudorreplicación y una falsa impresión de precisión. En un diseño de cuatro bloques con cuatro tratamientos, las unidades experimentales para el contraste del tratamiento son dieciséis parcelas, no las 480 plantas que el manuscrito reporta

como muestra para las áreas netas. Esta distinción es una condición central para interpretar un ANDEVA sin exagerar la cantidad de evidencia independiente.

La medición de componentes requiere protocolos estables. Contar vainas por planta, seleccionar vainas para estimar granos por fruto, pesar cien granos y registrar la masa de cosecha son tareas diferentes, cada una con sus fuentes de error. La selección de diez vainas debe seguir el procedimiento señalado y evitar sesgos hacia frutos de mayor tamaño; la balanza necesita resolución adecuada y calibración; el área neta tiene que delimitarse sin ambigüedad. El documento de origen detalla estas operaciones a nivel general, pero no permite reconstruir cada condición de laboratorio o de cosecha; esa limitación debe respetarse al examinar precisión y transferibilidad.

El rendimiento por hectárea combina población efectiva, producción individual y calidad del material cosechado. Por ello, un aumento de vainas por planta no necesariamente produce el mismo incremento proporcional de kg/ha. La lectura integrada de los componentes permite identificar dónde se manifiestan diferencias, aunque no prueba por sí misma qué proceso fisiológico las originó. En Cajabamba, por ejemplo, el tratamiento con mayor número de vainas no coincide con el máximo tabulado de granos por vaina. Esta observación invita a examinar compensaciones productivas, pero no a formular una causalidad nueva a partir de una tabla descriptiva.

4.2. Bloques completos y control de heterogeneidad

El diseño de bloques completos al azar organiza las parcelas de modo que todos los tratamientos aparezcan en cada bloque. La finalidad es reducir el efecto de variaciones relativamente homogéneas dentro de cada grupo, como un gradiente de fertilidad, humedad o posición topográfica, cuando resulta razonable agrupar las unidades de esa manera. Gómez y Gómez (1984) describen el valor de diseños experimentales y procedimientos estadísticos adaptados a la investigación agrícola. El bloqueo no elimina toda variabilidad ambiental, pero puede mejorar la precisión de comparación al distinguirla del contraste de tratamientos.

La aleatorización protege frente a sesgos sistemáticos de asignación. Si el investigador colocara siempre el tratamiento de mayor dosis en la zona más fértil, la diferencia observada podría atribuirse a ambas causas. Al asignar aleatoriamente los tratamientos dentro de cada bloque se reduce la posibilidad de confundir una posición con

una dosis. La validez del procedimiento depende de que el diseño se ejecute efectivamente y de que se preserven las condiciones comunes de manejo. La tabla de distribución original permite reconstruir qué tratamiento ocupó cada parcela, aunque no ofrece todos los detalles de cómo se realizó el sorteo.

El modelo aditivo de un diseño de bloques comprende media general, efecto de tratamiento, efecto de bloque y error aleatorio. Su uso presupone condiciones estadísticas cuya evaluación merece atención: independencia de errores, estructura razonable de variancias y adecuación del modelo a la variable. La presencia de números con decimales no asegura por sí sola el cumplimiento de estos supuestos. Los ANDEVA del caso reportan estadísticos F y niveles de significación, pero el documento no incluye una revisión moderna completa de residuos, transformaciones o análisis de sensibilidad. Debe leerse lo que el modelo presenta, sin afirmar que se realizaron diagnósticos que no se encuentran documentados.

El coeficiente de variación expresa la dispersión residual relativa a la media y se usa a menudo como indicador descriptivo de precisión experimental. Su interpretación depende del rasgo evaluado, de la escala y del contexto; no existe un umbral universal que convierta automáticamente un ensayo en válido o inválido. Las variables de conteo, masa y rendimiento pueden presentar niveles de variabilidad distintos. En Cajabamba se registran coeficientes de variación que van desde 3,13 % para peso de cien granos hasta 15,57 % para vainas por planta, cifras informativas que deben examinarse junto con el diseño y las comparaciones efectivamente realizadas.

Tabla 10. Alcances de distintos enfoques experimentales

Diseño	Pregunta que permite responder	Precaución
Dosis NPK conjunta	¿Difieren paquetes completos entre sí?	No separa el efecto individual de N, P y K.
Factorial N×P×K	¿Existen efectos e interacciones específicas?	Necesita más unidades experimentales.
Curva de respuesta	¿Cómo cambia el rendimiento con la dosis?	Requiere escalas y ajustes adecuados.
Ensayo multilocal	¿Se sostiene la respuesta en otros ambientes?	Exige replicación ambiental.
Presupuesto parcial	¿Se justifica económicamente el cambio?	Depende de precios y riesgos.

Fuente: Elaboración editorial propia, sustentada en las fuentes científicas citadas en los apartados correspondientes; categorías analíticas, no mediciones de campo.

4.3. Comparar medias y comprender el significado de significación

Una prueba de significación evalúa compatibilidad de resultados con una hipótesis estadística dentro de un modelo. No mide directamente el valor económico, la magnitud agronómica ni la probabilidad de que una dosis sea «la mejor» en toda situación. El ANDEVA puede detectar que existe heterogeneidad entre tratamientos; una prueba de comparaciones múltiples busca localizar diferencias entre medias controlando el procedimiento empleado. Duncan (1955) formuló una prueba de rangos múltiples utilizada en numerosos estudios agronómicos. Su empleo debe identificarse, porque diferentes procedimientos de comparación pueden operar con criterios distintos de control del error.

Los grupos de letras en una tabla de comparación no son un ranking definitivo. Si dos tratamientos comparten una letra, el procedimiento no distingue estadísticamente sus promedios al nivel señalado. Ello no demuestra igualdad exacta ni equivalencia agronómica; significa que, con ese análisis y los datos disponibles, no se obtuvo evidencia suficiente para separar las medias. Por el contrario, letras distintas indican diferencias detectadas bajo el procedimiento reportado. La interpretación exige revisar siempre la variable, el nivel de significación y el método utilizado, en vez de trasladar los grupos de una tabla de rendimiento a todos los componentes fisiológicos.

En el material original, T1, T2 y T3 forman el mismo grupo de Duncan para rendimiento por hectárea, mientras que el testigo se ubica en un grupo distinto. La media de T2 es numéricamente superior, pero la fuente no demuestra diferencia estadística de su rendimiento respecto a T1 y T3. La conclusión operativa razonable es que los paquetes fertilizados mostraron ventaja frente al testigo en esas condiciones, y que se requiere información adicional para discriminar con solidez entre ellos. Presentar T2 como dosis universalmente óptima o superior estadísticamente a T3 sería una sobreinterpretación.

El tamaño de muestra, la variabilidad y el tamaño real del efecto influyen en la capacidad de detectar diferencias. Un experimento pequeño puede dejar sin separar alternativas con promedios distintos; al mismo tiempo, una diferencia detectada no siempre justifica económicamente adoptar un tratamiento más costoso. Para evaluar equivalencia o no inferioridad hacen falta diseños e hipótesis apropiados; no basta con observar una comparación «no significativa». Esta distinción resulta especialmente importante al

recomendar insumos: el productor desea saber qué alternativa ofrece un beneficio suficiente bajo riesgo, no únicamente si dos números son distintos.

La disciplina editorial también alcanza los valores de significación. El manuscrito informa niveles de 5 % y 1 % y estadísticos F; no presenta en todos los cuadros valores p exactos. El libro conserva las decisiones de significación originales sin inventar probabilidades específicas. Aunque podrían calcularse estimaciones adicionales bajo un conjunto de supuestos, presentarlas como resultados de la fuente desdibujaría su trazabilidad. Cuando se incorporan operaciones nuevas, deben declararse explícitamente como análisis secundarios y explicar sus procedimientos y límites.

4.4. Dosis conjunta, función de respuesta y problemas de identificación

El experimento de Cajabamba incrementó simultáneamente las cantidades asignadas a nitrógeno, fósforo y potasio entre T1, T2 y T3. Esta estructura es útil para comparar paquetes completos, pero no permite separar el efecto de cada componente. Si T2 presenta mayor rendimiento que T1, la diferencia podría relacionarse con uno de los nutrientes, con una interacción o con otros mecanismos de respuesta; el diseño no incluye combinaciones factoriales que permitan identificar esas contribuciones. Una interpretación que afirme «el fósforo aumentó el rendimiento» excedería la información experimental salvo que se apoyara únicamente en una hipótesis externa, claramente marcada como tal.

Una curva de respuesta nutricional requiere niveles de un factor interpretables en una escala y observaciones suficientes para representar su comportamiento. En la práctica, la respuesta puede aumentar inicialmente, mostrar rendimientos decrecientes y estabilizarse, o variar de forma diferente según el suelo y la campaña. Sin embargo, cuando tres macronutrientes cambian simultáneamente, el eje horizontal no representa una dosis única de nutriente. Tampoco una media máxima observada necesariamente determina el vértice verdadero de una función biológica: la posición del óptimo depende de la forma del modelo, de su incertidumbre y del intervalo realmente evaluado.

La ley de los factores limitantes constituye una guía conceptual, no un algoritmo infalible para calcular dosis. Si un nutriente está extremadamente limitado, aportar otro que ya sea suficiente podría producir escasa respuesta. Una vez corregida la limitación dominante, otro factor —agua, radiación, enfermedad, densidad— puede controlar el

rendimiento. Las respuestas de los cultivos son multidimensionales, y las relaciones pueden variar con la fenología. Esta perspectiva ayuda a explicar por qué un tratamiento con más fertilizante no tiene garantizado alcanzar el mayor promedio; de hecho, la tabla original sitúa a T3 por debajo de T2 en rendimiento, pese a representar un paquete nominalmente mayor.

Soratto et al. (2013) estudiaron extracción y exportación de macronutrientes entre cultivares de frijol y niveles de fertilización, un aspecto que ayuda a distinguir rendimiento de balance nutricional del sistema. Mortinho et al. (2022) examinaron coinoculación con bacterias promotoras del crecimiento y eficiencia de fertilización NPK. Estas aproximaciones amplían la pregunta desde cuánto grano se obtiene hacia cuánto nutriente se extrae, cuánto se utiliza y qué parte del manejo podría complementarse mediante procesos biológicos. Los indicadores correspondientes no se midieron en el ensayo de origen.

La calibración basada en suelo ofrece una vía para salir de la simple extrapolación. Kassa y Kifle (2023) evaluaron formulaciones NPSB y su relación con propiedades edáficas y retorno económico. De forma complementaria, los estudios de meta-análisis, como el de Monteiro Filho et al. (2022) sobre respuestas a nitrógeno en sistemas brasileños, reúnen resultados de múltiples condiciones y permiten explorar patrones de heterogeneidad. Ninguna síntesis sustituye una evaluación local, pero puede ayudar a formular rangos plausibles, definir factores explicativos y seleccionar diseños más informativos para un territorio concreto.

4.5. De la diferencia productiva a la decisión económica

La decisión del agricultor puede modelarse a partir del incremento de ingreso y del incremento de costo. El rendimiento observado representa una parte del ingreso potencial; para convertirlo en margen se requiere conocer el precio realmente obtenido, posibles descuentos por calidad, gastos de cosecha, transporte, aplicaciones e insumos. Si una tecnología requiere una inversión adicional, el productor asume un riesgo antes de saber cuál será el precio de venta o el clima de la campaña. La rentabilidad no está contenida en la cifra kg/ha. Un informe científico que confunde ambos indicadores puede inducir decisiones económicas equivocadas.

Un presupuesto parcial compara únicamente los costos e ingresos que cambian entre alternativas. Su utilidad radica en que evita añadir rubros idénticos que no afectan la elección.

La interpretación se fortalece cuando los precios se someten a escenarios: precios de venta bajos, medianos y altos, diferentes condiciones de disponibilidad de mano de obra y posibles variaciones en el costo de los fertilizantes. No es necesario inventar un «precio actual» para explicar el método. En el estudio de Cajabamba, la falta de registros de costos y de comercialización obliga a tratar la superioridad de T2 como numérica dentro del ensayo, no como un resultado de máximo beneficio.

También interesa el riesgo. Dos tratamientos pueden producir rendimientos medios semejantes, pero mostrar sensibilidad distinta frente a sequía, volatilidad de precios o retrasos en aplicación. Estimar el riesgo requiere datos entre campañas o un diseño de escenarios explícitos, no impresiones derivadas de un único año. La investigación participativa puede identificar problemas de adopción, pero sus testimonios deben recopilarse y reportarse de manera trazable. Un programa de asesoría que recomiende incrementar inversión debería ponderar la capacidad del productor para absorber una campaña desfavorable además de la ganancia potencial en años normales.

La calidad del grano y los efectos ambientales introducen otras dimensiones. Una aplicación puede afectar el suelo de forma distinta dependiendo de pérdidas por erosión, escorrentía o balance entre nutrientes aportados y extraídos. El informe de la FAO (2024) sobre transformación basada en valor propone atender costos más amplios de los sistemas agroalimentarios, aunque no proporciona una monetización específica para este experimento. En aplicaciones locales, conviene evitar cifras agregadas no sustentadas y utilizar el marco únicamente para recordar que los beneficios de una tecnología tienen dimensiones productivas, económicas y ecológicas.

Tabla 11. Marco de indicadores para seguimiento de una intervención

Dimensión	Indicador	Momento
Entrada	kg de fertilizante y costo de adquisición	Antes de siembra
Proceso	Registro de aplicación y riegos	Durante el ciclo
Biológica	Emergencia, sanidad y nodulación	Etapa vegetativa
Producción	Vainas, masa de granos, kg/ha	Cosecha
Calidad	Humedad, uniformidad y daño	Poscosecha
Social	Aceptación, acceso y condiciones de trabajo	Evaluación
Ambiental	Nutrientes residuales y conservación del suelo	Cierre de campaña

Fuente: Elaboración editorial propia, sustentada en las fuentes científicas citadas en los apartados correspondientes; categorías analíticas, no mediciones de campo.

La unidad experimental y el problema de la pseudorreplicación

Una investigación puede acumular cientos de mediciones y, sin embargo, disponer de un número relativamente pequeño de unidades experimentales independientes. Esta diferencia es decisiva en ciencias agrarias. Si el tratamiento se asigna a una parcela, esa parcela constituye la unidad sobre la cual actúa la comparación causal. Varias plantas observadas dentro de la misma parcela aportan precisión para describirla, pero no equivalen a parcelas adicionales asignadas independientemente. Confundir submuestras con replicaciones infla artificialmente los grados de libertad y puede producir conclusiones estadísticas engañosas. En Cajabamba hubo 16 unidades experimentales organizadas en cuatro bloques con cuatro tratamientos; el número de plantas de la muestra no sustituye ese diseño.

La submuestra aporta información en otra escala. Diez plantas elegidas para evaluar vainas pueden representar heterogeneidad biológica dentro de una parcela, mientras la respuesta del tratamiento se estima entre parcelas comparables. Las decisiones analíticas deben preservar la jerarquía: planta dentro de parcela, parcela dentro de bloque, tratamiento asignado a parcelas. Cuando solo se dispone de medias por parcela, el análisis de varianza utiliza las 16 observaciones correspondientes; cuando se conservan los datos individuales, un modelo jerárquico puede explorar fuentes adicionales de variación, siempre que su especificación responda al diseño. El mero acceso a observaciones individuales no autoriza tratarlas como unidades independientes si compartieron fertilización, suelo y manejo.

Esta distinción tiene consecuencias prácticas para el trabajo de campo. Las etiquetas de cada muestra deben vincularla con la parcela y el bloque de procedencia. Una base de datos debería conservar identificadores únicos, fecha, unidad, variable, valor y, cuando corresponda, observador. El registro solo del promedio final facilita una comparación simple, pero impide explorar valores atípicos, errores de captura o variación intraparcelaria. La tesis ofrece tablas por bloques para las variables principales; son valiosas porque permiten auditar parcialmente el análisis original. No reemplazan toda la base de observaciones de plantas, cuya disponibilidad no se confirma en el manuscrito.

La aleatorización actúa para evitar asociaciones sistemáticas entre tratamientos y condiciones no controladas. En bloques completos, cada bloque contiene todos los tratamientos, y el orden se aleatoriza para que un gradiente local no beneficie deliberadamente a uno de ellos. La estrategia mejora precisión cuando el bloqueo captura

parte de la heterogeneidad. Sin embargo, aleatorizar no asegura automáticamente ausencia de errores de aplicación, uniformidad de semilla o independencia entre parcelas vecinas. El protocolo de campo debe reducir posible deriva de fertilizante, escorrentía entre parcelas y diferencias operativas. La significación estadística adquiere sentido cuando se conoce la calidad del proceso experimental que produjo los datos.

Significación, tamaño de efecto y utilidad agronómica

El análisis de varianza examina la compatibilidad entre la variación observada de tratamientos y la variación residual bajo supuestos del modelo. Una prueba global significativa indica evidencia contra la igualdad simultánea de medias, pero no identifica por sí sola qué tratamientos se distinguen ni cuánto importa la diferencia. Las pruebas de comparación múltiple permiten ordenar contrastes siguiendo reglas de decisión específicas. En el estudio de Cajabamba, Duncan agrupó a los tres tratamientos fertilizados como estadísticamente equivalentes en rendimiento por hectárea, pese a que sus promedios no fueron idénticos. Esta distinción entre valor mayor y diferencia demostrada evita atribuir certeza excesiva a un orden descriptivo.

El tamaño de efecto se refiere a la magnitud observada de una diferencia y requiere unidades comprensibles. Frente al testigo de 2 809,50 kg/ha, T2 reportó 4 687,50 kg/ha, una diferencia aritmética de 1 878,00 kg/ha. T1 presentó 1 747,75 kg/ha adicionales y T3, 1 783,75 kg/ha, al comparar sus medias con el control. Estas restas son elaboraciones editoriales de cifras publicadas; no sustituyen intervalos de confianza ni un nuevo análisis formal. Su valor consiste en mostrar el orden de magnitud productiva que merece análisis económico, sin confundirlo con estabilidad en otras campañas o con una tasa causal de respuesta por kilogramo de cada nutriente.

Los valores p expresan evidencia estadística en relación con hipótesis y modelo, no la probabilidad de que una recomendación funcione en otra finca. Tampoco equivalen a la probabilidad de que una hipótesis sea verdadera. Una diferencia puede ser estadísticamente detectable pero pequeña para el productor; otra puede resultar económicamente relevante y, aun así, no alcanzarse significación con un experimento de escasa potencia. La presentación rigurosa debería incluir medias, variabilidad, tamaño de muestra y un comentario sobre magnitud práctica. La fuente original ofrece cuadros de ANDEVA y Duncan, y conserva

grados de libertad para tratamientos, bloques y error. El libro no inventa intervalos de confianza que el análisis publicado no proporciona.

Las comparaciones múltiples agregan otra capa de decisión. Diferentes pruebas controlan errores de manera distinta; la prueba de Duncan utilizada históricamente en el ensayo posee un criterio de agrupamiento que debe identificarse por su nombre, nivel y aplicación. No sería correcto reetiquetar sus letras como resultados de Tukey o Bonferroni. Si se reanalizan los datos originales, corresponde declarar explícitamente que se trata de una nueva evaluación, mostrar el método empleado y distinguirla del resultado reportado. Una edición académica puede explicar sus implicaciones sin reemplazar silenciosamente pruebas y cuadros de la tesis.

Supuestos del modelo y diagnóstico de residuos

El modelo lineal clásico de bloques completos supone que los términos de error tienen características compatibles con el análisis y que la estructura de los bloques representa adecuadamente parte de la heterogeneidad. La comprobación debe observar residuos, dispersión, posibles valores extremos y patrones por tratamiento o bloque. La evaluación formal de normalidad por sí sola no garantiza ajuste adecuado; conviene también examinar gráficamente si la variación aumenta con la media o si hay observaciones atípicas relacionadas con errores de registro. Con apenas cuatro bloques, estas inspecciones tienen limitaciones, pero siguen siendo útiles para decidir si el modelo describe razonablemente los datos.

Las transformaciones de variables pueden ser pertinentes bajo ciertas distribuciones, aunque siempre modifican la escala de interpretación. En variables de conteo, la media y la varianza a veces guardan relaciones que no cumplen homocedasticidad; en producción y masa, la distribución puede presentar asimetría. La opción entre transformar datos y utilizar modelos alternativos depende de diseño, cantidad de observaciones y objetivo de inferencia. No se debe aplicar una transformación retrospectiva únicamente para obtener un valor p menor. El libro conserva el análisis publicado e identifica los diagnósticos adicionales como componentes de una posible reevaluación, no como comprobaciones efectuadas por el equipo original.

La independencia merece una revisión específica. Parcelas vecinas pueden compartir gradientes de humedad o recibir movimiento superficial de nutrientes; mediciones sucesivas de una misma parcela están correlacionadas. El esquema de bloques ayuda con algunas fuentes de heterogeneidad espacial, pero no elimina todos los efectos de vecindad. Experimentos futuros podrían registrar coordenadas de cada parcela y condiciones edáficas para explorar patrones espaciales. Sin embargo, introducir ajustes complejos sin cantidad suficiente de observaciones puede generar estimaciones inestables. La prioridad sigue siendo un diseño físico que minimice interferencias y un análisis que respete su estructura.

Los coeficientes de variación incluidos en la tesis ofrecen una descripción de dispersión relativa por variable, no una calificación universal de calidad. El CV puede depender de la escala y de la naturaleza de la medición; comparar directamente uno de vainas con otro de peso de grano no implica que una variable sea más confiable en sentido absoluto. También conviene vigilar discrepancias internas de la fuente, como errores tipográficos en desviaciones estándar o etiquetas de cuadros. La edición científica responsable reproduce las cifras originales con atribución, describe inconsistencias cuando son relevantes y evita «corregirlas» mediante valores imaginados.

La función de respuesta y el rango realmente observado

La secuencia de tratamientos T1, T2 y T3 puede sugerir visualmente una curva de dosis-respuesta, pero el diseño modificó simultáneamente tres nutrientes. Por ello el eje horizontal no representa un nutriente único, sino un conjunto ordenado de paquetes. La lectura correcta se limita a comparar combinaciones observadas. Un aparente máximo en T2 no prueba que el nitrógeno, el fósforo o el potasio alcanzaran individualmente un nivel óptimo; tampoco demuestra una caída de rendimiento por exceso de un elemento. Para inferir una función de respuesta elemental, se requeriría variar ese elemento mientras las otras condiciones permanecen controladas, con replicaciones suficientes.

Una función cuadrática ajustada a tres dosis puede producir un vértice matemático, pero esa operación sería especialmente frágil cuando cada nivel modifica varios nutrientes. El coeficiente estimado mezclaría cambios simultáneos y no permitiría separar mecanismos. Además, extrapolar fuera del intervalo de dosis observado sería arriesgado porque la relación biológica puede presentar umbrales, saturación o cambios de limitación. Un programa experimental orientado a recomendación debería incluir niveles intermedios pertinentes, un

control y, cuando sea posible, una serie de años y localidades. La curva se convertiría así en una hipótesis puesta a prueba, no en una ilustración interpretada como verdad universal.

La respuesta marginal económica plantea otra pregunta. El precio del grano varía según calidad, época y mercado, y el costo marginal de aplicar fertilizante incluye insumo, traslado, distribución y financiamiento. Un aumento descriptivo de 130,25 kg/ha entre los promedios de T2 y T1 no demuestra por sí solo que T2 sea mejor negocio. Aquel incremento debe valorizarse y compararse con el mayor costo del paquete, recordando además que ambos tratamientos se agruparon estadísticamente en rendimiento. El ensayo original no presenta un presupuesto parcial completo, por lo que el libro no asigna costos ficticios ni calcula una rentabilidad histórica inexistente.

La decisión económica ante incertidumbre

El presupuesto parcial es útil cuando se comparan alternativas de manejo que comparten gran parte de sus operaciones. Se identifican los costos que cambian entre opciones y los beneficios económicos adicionales; el análisis no exige atribuir artificialmente costos fijos idénticos a cada tratamiento para decidir entre paquetes. Su utilidad aumenta si se acompañan precios de mercado verificables y rendimientos ajustados a pérdidas poscosecha relevantes. Kassa y Kifle (2023) ilustran la aplicación de este enfoque a evaluaciones de fertilización en frijol. Sus precios y respuestas pertenecen a otro escenario y no pueden importarse como si describieran la economía de Huacrachuco.

La decisión de adoptar una tecnología depende de riesgos además del promedio. Un tratamiento puede generar buen resultado medio y alta variabilidad entre temporadas; otro puede ofrecer ganancia más modesta pero estable. El productor también enfrenta restricciones de liquidez, calendario de trabajo, disponibilidad de fertilizante y riesgo comercial. Para estimar estas dimensiones se necesitan series temporales y registros de costos; un experimento de una campaña ofrece información inicial, no una distribución completa de riesgo. La evaluación de sensibilidad puede explorar precios bajos, medios y altos, pero debe etiquetar claramente tales cifras como escenarios y no como resultados observados.

Las políticas de recomendación deberían preferir afirmaciones escalonadas. Es legítimo sostener que las combinaciones fertilizadas superaron al testigo bajo el ensayo y que

T2 exhibió el promedio más alto. No resulta legítimo afirmar sin datos que T2 maximiza la rentabilidad del frijol Cápsula o que la dosis será superior en todos los suelos de la región. Esta diferencia no reduce el valor de la experimentación: permite utilizarla de modo responsable, como evidencia de una respuesta potencial que merece validación y estimación económica.

Datos abiertos y capacidad de reproducción

La reproducibilidad requiere más que publicar tablas finales. Una base organizada con identificadores de tratamiento y bloque permite recalcular promedios y contrastar conversiones; un diccionario de datos explica unidades y reglas de codificación; un protocolo describe cuándo y cómo se midió cada variable. Cuando se corrige un error, la versión inicial debería preservarse y acompañarse de una nota que identifique cambio, fuente de validación y fecha. De lo contrario, diferentes lectores pueden trabajar con versiones incompatibles sin comprender por qué. Esta trazabilidad beneficia tanto la revisión editorial como la continuidad experimental.

Un libro científico construido a partir de una tesis necesita diferenciar datos empíricos heredados de cálculos de autoría editorial. Restar rendimientos o sintetizar tratamientos en una tabla nueva es admisible si se declara la procedencia de las cifras. En cambio, atribuir valores p adicionales o declarar un tamaño de efecto estandarizado sin detallar su cálculo sería una ampliación estadística no transparente. La fuente original contiene errores internos en algunas narrativas; el deber editorial consiste en mostrarlos, priorizar los cuadros de observaciones cuando corresponde y evitar modificaciones silenciosas que aparenten un estudio más consistente de lo que permite la evidencia.

La colaboración entre investigadores, productores y editores puede fortalecer esta cultura. Un repositorio institucional con licencia clara, archivos de datos y versiones de protocolo facilita comparación entre localidades. La protección de información personal y acuerdos de colaboración deben mantenerse cuando existen agricultores participantes o datos sensibles de finca. Documentar limitaciones no equivale a desacreditar una investigación; permite que la siguiente generación de estudios formule preguntas mejor definidas y elabore recomendaciones cuya precisión se corresponda con los datos disponibles. Este puente entre medición, interpretación y decisión sustenta la lectura del experimento de Cajabamba que ocupa el capítulo siguiente.

Precisión experimental y planificación de la muestra

La planificación de un ensayo debe responder simultáneamente a una pregunta biológica y a una expectativa de variación. El número de repeticiones apropiado depende de la dispersión entre parcelas, del tamaño de diferencia que interesa detectar y de los recursos disponibles. Cuatro bloques pueden ofrecer información valiosa bajo condiciones relativamente uniformes, pero quizá no permitan distinguir diferencias pequeñas entre tratamientos cuando la variación residual es considerable. Un resultado no significativo no demuestra identidad exacta de los tratamientos; indica que el contraste no proporcionó evidencia suficiente bajo el diseño y el umbral utilizado. Este matiz importa cuando se comparan niveles de fertilización cercanos.

Una planificación prospectiva podría utilizar datos históricos de variación para estimar necesidades de muestra, pero debe especificar el efecto mínimo de interés. Ese efecto puede definirse en kilogramos por hectárea o en beneficio económico adicional, siempre que se justifique por el contexto. No resulta válido fijar un tamaño de muestra solo para lograr significación estadística sin considerar si la diferencia detectable tendría utilidad comercial. Las evaluaciones que combinan agronomía y economía ganan claridad cuando establecen anticipadamente cuál cambio de producción compensaría razonablemente el costo añadido y qué incertidumbre están dispuestas a aceptar.

El diseño de bloques requiere conocer qué factor ambiental se pretende controlar. Si la principal heterogeneidad sigue un gradiente de fertilidad o pendiente, la orientación de bloques puede mejorar la comparabilidad; si se desconoce la estructura espacial, conviene caracterizarla antes de distribuir tratamientos. En grandes superficies, diseños con más bloques o estructuras espaciales pueden ser pertinentes. La complejidad no siempre mejora la inferencia: un plan simple ejecutado sin errores y con registro completo puede ser más útil que uno sofisticado cuya aleatorización o aplicación no se cumplió. La documentación del campo de Cajabamba proporciona un esquema de distribución que facilita comprender cómo se organizó la comparación original.

Sensibilidad de la recomendación a costos y precios

Un aumento de rendimiento debe traducirse a ingresos bajo supuestos explícitos. El precio relevante es el efectivamente recibido en la puerta de finca o punto de venta que se

utilice como referencia, después de descuentos y pérdidas de calidad aplicables. El costo incremental debe sumar insumo, transporte, labores adicionales e intereses cuando correspondan. La simple multiplicación de rendimiento por un precio promedio publicado puede sobrestimar margen si ignora condiciones de comercialización. Un análisis riguroso tiene que fechar las fuentes de precios y mantener su procedencia, pues costos de fertilizantes y granos pueden variar sustancialmente entre ciclos.

Los resultados económicos son sensibles a varios escenarios. Si el precio del grano baja o el fertilizante sube, una opción con mayor rendimiento podría perder atractivo; si la diferencia de producción está dentro de la variabilidad experimental, el cálculo monetario tampoco debería expresarse con confianza excesiva. En un programa de investigación sería apropiado combinar presupuestos parciales con análisis de sensibilidad y, cuando existan varias campañas, con estimaciones de variación interanual. La tesis recomienda evaluar rentabilidad como investigación posterior, reconocimiento que el libro conserva sin imputar al experimento balances financieros inexistentes.

La rentabilidad no agota la decisión. La necesidad de financiamiento inicial y la oportunidad del ingreso pueden influir en una familia agrícola incluso si dos alternativas presentan igual margen esperado. El riesgo de no recuperar la inversión, la posibilidad de comprar fracciones de saco, la logística de transporte y los compromisos de mano de obra generan restricciones concretas. Por esta razón, la transferencia tecnológica requiere diálogo con productores y datos reales sobre su contexto. Las recomendaciones deben identificar condiciones mínimas de pertinencia, no presentar como universal una dosis sustentada en una sola localidad.

Comunicación de incertidumbre para usuarios no especialistas

La manera de comunicar el resultado también forma parte de la calidad científica. Decir que «T2 tuvo mayor promedio» informa sobre el orden de las observaciones; decir que «T2 fue estadísticamente superior» exige una prueba que lo distinga del comparador específico. Cuando tres tratamientos comparten una letra en una tabla de comparaciones, esa agrupación debe explicarse en palabras que el lector comprenda. Un informe que omite la incertidumbre puede impulsar compras innecesarias o expectativas productivas irreales, aunque sus números de partida sean auténticos.

La representación gráfica debe evitar escalas engañosas y conservar unidades. Las barras de rendimiento pueden mostrar visualmente pequeñas diferencias entre paquetes que, estadísticamente, no se separaron; por ello resulta conveniente incluir notas sobre grupos de significación o intervalos cuando existan. Un gráfico derivado de medias históricas no constituye una nueva observación experimental. El libro vuelve a dibujar algunos resultados para facilitar lectura, pero atribuye cada conjunto de cifras y distingue esos gráficos editoriales de las figuras originales. La claridad visual es útil solo cuando respeta el significado de la evidencia.

El capítulo concluye que el dato experimental necesita una gramática de interpretación. La unidad de análisis, el diseño de bloques, los supuestos del ANDEVA, las comparaciones múltiples y las unidades de rendimiento determinan qué inferencias son admisibles. La discusión económica añade una segunda exigencia: la diferencia biológica debe contrastarse con costos, calidad y riesgo. Con estos criterios definidos, el siguiente capítulo puede examinar el ensayo de Cajabamba sin confundir la evidencia primaria con las explicaciones construidas posteriormente.

CAPÍTULO V

EL EXPERIMENTO DE CAJABAMBA: EVIDENCIA Y TRAZABILIDAD

El experimento realizado en Cajabamba es el núcleo empírico de esta obra. Su valor reside en presentar mediciones de un cultivar concreto bajo tres combinaciones de fertilización completa y una condición testigo. Para preservar su carácter científico, la exposición conserva diseño, poblaciones, áreas, dosis y cifras de los cuadros originales; distingue los promedios de sus posibles mecanismos; y señala aquellas inconsistencias documentales que requieren cotejo con los registros primarios. Los gráficos del libro reorganizan visualmente la información recibida, pero no sustituyen ni corrigen las tablas originales.

5.1. Territorio, parcela y criterios de observación

El escenario registrado es Cajabamba, distrito de Huacrachuco, provincia de Marañón, región Huánuco, Perú. La fuente consigna las coordenadas 8° 33′ 39″ de latitud sur y 76° 13′ 37″ de longitud oeste, y una altitud de 2 265 m s. n. m. La zona es descrita como perteneciente a la región natural Quechua y a la formación bosque seco Montano Bajo Tropical. Las coordenadas y clasificaciones se reproducen como información reportada por los investigadores, sin realizar una nueva validación geoespacial del predio. El trabajo estaba destinado a evaluar la respuesta del frijol Cápsula a distintas dosis de fertilización bajo las condiciones agroecológicas consideradas en ese lugar (Pantoja Medina et al., 2026a).

La descripción edáfica indica un suelo de origen transportado, aluvial, de pendiente moderada y textura franco-arcillo-arenosa. El documento consigna una profundidad de capa arable de hasta 0,4 m y ofrece una valoración cualitativa de nutrientes: nitrógeno, fósforo y manganeso bajos; potasio, calcio, magnesio y zinc medios. No se presenta aquí una tabla completa de resultados analíticos con sus unidades, por lo que estas clases deben tomarse como apreciaciones consignadas en el archivo, no como mediciones químicas independientes

reconstruidas en el libro. La ausencia de concentraciones impide evaluar directamente cuánta fracción del fósforo aplicado permaneció disponible o cuál era la reserva nitrogenada inicial.

El clima informado presenta temperaturas medias mensuales entre 17,54 y 19,26 °C y valores de humedad relativa entre 54,55 y 59,37 % para enero a abril. El cuadro se mantiene en su expresión original para evitar confusiones con máximas y mínimas. Esta información ayuda a caracterizar las condiciones generales durante el ciclo señalado, aunque no permite obtener evapotranspiración, déficit hídrico, distribución diaria de precipitación o balance de agua del suelo. La experiencia, por tanto, pertenece a un marco climático concreto que se describe parcialmente. Las comparaciones con otros ensayos deberían incorporar esta incertidumbre de forma explícita.

La superficie total del campo fue registrada como 256,96 m², mientras que las 16 parcelas tuvieron 9,36 m² de área bruta y 1,8 m² de área neta. Cada bloque incorporó cuatro tratamientos; los surcos se separaron 0,60 m, los golpes 0,30 m y se colocaron tres semillas por golpe. La fuente reporta 156 plantas por parcela experimental, que suman las 2 496 plantas de la población total. La muestra de las áreas netas correspondió a 30 plantas por parcela, es decir, 480 plantas en el conjunto experimental. Estas cifras son las unidades documentadas y no deben confundirse con el número de réplicas estadísticas del tratamiento.

Tabla 12. Geometría y esquema de la unidad experimental

Descripción	Valor consignado	Uso
Área total experimental	256,96 m²	Disposición general
Parcela bruta	9,36 m²	Unidad experimental
Parcela neta	1,8 m²	Cosecha y extrapolación
Plantas por parcela	156	Población instalada
Población total	2 496	16 parcelas
Muestra total	480 plantas	30 por parcela neta
Separación entre surcos	0,60 m	Diseño espacial
Separación entre golpes	0,30 m	Diseño espacial
Semillas por golpe	3	Siembra

Fuente: Pantoja Medina et al. (2026), manuscrito académico proporcionado; transcripción fiel de las cifras reportadas.

5.2. Organización de los tratamientos y procedimientos de campo

El estudio fue definido como aplicado y experimental, con un Diseño de Bloques Completos al Azar, cuatro tratamientos y cuatro repeticiones, para un total de 16 unidades experimentales. Se compararon tres paquetes de fertilización completa N-P-K y un testigo sin fertilización añadida. En el orden de la fuente, T1 correspondió a 20–60–30, T2 a 40–80–40 y

T3 a 60–100–50. El cuadro incluye, además, equivalentes de fertilizantes comerciales 44–130–50, 87–174–67 y 130–217–83. Las unidades y la base química de estos encabezados no aparecen rotuladas de forma completa en el cuadro suministrado; por fidelidad documental, la obra no las completa de manera tácita.

Tabla 13. Tratamientos N-P-K de la investigación de Cajabamba

Código	Dosis N-P-K indicada	Fertilizantes indicados	Condición
T0	Sin incorporación (testigo)	Análisis de suelo	Fertilidad natural
T1	20–60–30	44–130–50	Fertilizado
T2	40–80–40	87–174–67	Fertilizado
T3	60–100–50	130–217–83	Fertilizado

Fuente: Pantoja Medina et al. (2026), manuscrito académico proporcionado; transcripción fiel de las cifras reportadas. La tesis no imprime unidades en el encabezado de estas cifras; no se infieren en esta tabla.

Las fuentes usadas fueron urea comercial, superfosfato triple de calcio y cloruro de potasio. El protocolo señala que fósforo, potasio y la mitad del nitrógeno se aplicaron al momento de la siembra, y la mitad restante del nitrógeno durante el cambio de surco. En consecuencia, la comparación no evalúa productos comerciales alternativos ni otros esquemas de fraccionamiento: todos los tratamientos fertilizados pertenecen a una misma estrategia de fuentes y oportunidad de aplicación. Tampoco mide el efecto independiente de N, P o K, ya que sus cantidades cambian en conjunto. Esta limitación es estructural y no depende de la calidad de ejecución del campo.

Tabla 14. Asignación original de tratamientos por bloque

Bloque	Primera parcela	Segunda	Tercera	Cuarta
I	T2	T3	T0	T1
II	T0	T1	T2	T3
III	T1	T3	T0	T2
IV	T0	T1	T2	T3

Fuente: Pantoja Medina et al. (2026), manuscrito académico proporcionado; transcripción fiel de las cifras reportadas.

La conducción del ensayo comprendió preparación de terreno con yunta, nivelación y surcado; siembra de material certificado; deshierbos manuales; cambio de surco a los 23 días de la siembra; riego por gravedad conforme a necesidad; medidas fitosanitarias preventivas; y cosecha manual de vainas cuando las plantas alcanzaron madurez. La fuente describe tratamiento previo de semillas y prueba de germinación, pero no ofrece una serie longitudinal de establecimiento ni registros completos de riego o sanidad que permitan cuantificar su aporte al rendimiento. El libro recoge esos procedimientos porque ayudan a comprender bajo qué manejo se observaron las respuestas de la fertilización.

La muestra de suelo fue recolectada mediante un recorrido en zigzag, con excavaciones hasta 40 cm y combinación de submuestras para constituir una muestra representativa de 1 kg. El material fue enviado al laboratorio de suelos de la Estación Experimental Agraria Santa Ana de Huancayo. Se contó, asimismo, con información meteorológica de la Agencia Agraria Marañón. Esta secuencia evidencia la intención de vincular la fertilización con condiciones edáficas y climáticas. No obstante, sin disponer del informe de laboratorio completo en la versión proporcionada, deben permanecer abiertas las preguntas sobre concentración, método analítico y fecha de muestreo.

La recolección de datos siguió cinco indicadores. Para estimar vainas por planta se contaron frutos de diez plantas de cada área neta; para granos por vaina se tomaron diez vainas al azar; el peso de cien granos se determinó con balanza de precisión; la masa de cosecha de cada área neta se expresó en kg; y el rendimiento se transformó a unidades por hectárea. El esquema estadístico incluyó ANDEVA y prueba de rangos múltiples de Duncan a los niveles reportados de 5 % y 1 %. Esta metodología permite examinar la respuesta por parcela a paquetes completos de fertilización, pero no permite reconstruir mediciones de procesos que nunca fueron registrados, como fijación de nitrógeno o absorción total de fósforo.

Tabla 15. Variables y operación de medición en el ensayo

Variable	Procedimiento registrado	Unidad
Vainas por planta	Conteo de vainas en diez plantas	número
Granos por vaina	Conteo en diez vainas al azar	número
Peso de 100 granos	Pesaje de cien granos en balanza	gramos
Granos en área neta	Pesaje del producto cosechado	kilogramos
Rendimiento por hectárea	Extrapolación a 10 000 m²	kilogramos por hectárea

Fuente: Pantoja Medina et al. (2026), manuscrito académico proporcionado; transcripción fiel de las cifras reportadas.

5.3. Componentes reproductivos y masa individual del grano

El primer indicador corresponde al número medio de vainas por planta. La fuente registra 6,300 vainas para T0, 9,625 para T1, 11,875 para T2 y 10,450 para T3. El ANDEVA informó un estadístico F de 10,10 para tratamientos, señalado como altamente significativo, y un coeficiente de variación de 15,57 %. Según la comparación de Duncan al 5 %, los tres tratamientos fertilizados compartieron la letra «a» y el testigo se ubicó en el grupo «b». Esta estructura permite describir una diferencia respecto del testigo, pero no distinguir

estadísticamente entre sí a las medias de T1, T2 y T3 dentro de ese procedimiento (Pantoja Medina et al., 2026a).

Tabla 16. Promedios publicados de vainas por planta

Tratamiento	Vainas / planta	Grupo Duncan, 5 %
T0	6,300	b
T1	9,625	a
T2	11,875	a
T3	10,450	a

Fuente: Pantoja Medina et al. (2026), manuscrito académico proporcionado; transcripción fiel de las cifras reportadas.

El valor máximo numérico de vainas por planta se produjo en T2. Como interpretación agronómica, esta observación es compatible con la idea de que la mejora de la oferta nutricional puede favorecer la capacidad reproductiva. No demuestra qué nutriente fue responsable ni permite asegurar que un paquete igual produciría las mismas 11,875 vainas en otra campaña. La comparación con estudios externos debe considerar el hábito de crecimiento, densidad, clima y criterios de conteo. La diferencia entre tratar la cifra como evidencia local y transformarla en regla universal es fundamental para evitar conclusiones sobredimensionadas.

El número de granos por vaina muestra otro patrón. Los promedios desagregados de los resultados fueron 3,85 para T0, 4,28 para T1, 4,13 para T2 y 3,78 para T3. El ANDEVA presentó F = 5,62 como significativo para tratamientos, con CV de 4,93 %. En Duncan al 5 %, T1 y T2 compartieron la letra «a», T0 figuró con «b» y T3 con «c». El mayor promedio tabulado correspondió a T1, no a T2. El resumen introductorio y la publicación relacionada de 2026 atribuyen 4,28 a T2, pero la matriz de resultados y el anexo de la versión suministrada identifican inequívocamente esa cifra como promedio de T1. La obra usa como referencia primaria la tabla de datos desagregados y mantiene visible la contradicción.

Tabla 17. Promedios originales de granos por vaina

Tratamiento	Granos / vaina	Grupo Duncan, 5 %
T0	3,85	b
T1	4,28	a
T2	4,13	a
T3	3,78	c

Fuente: Pantoja Medina et al. (2026), manuscrito académico proporcionado; transcripción fiel de las cifras reportadas. Se conserva la tabla del capítulo de resultados, aunque el resumen atribuye incorrectamente 4,28 a T2.

La discrepancia no es meramente tipográfica desde el punto de vista interpretativo. Si se afirmara que T2 alcanzó simultáneamente los mejores valores de todos los componentes del rendimiento, la exposición eliminaría una señal de diversidad de respuesta entre indicadores. El dato de que T1 presenta el máximo tabulado de granos por vaina permite una interpretación más matizada: diferentes paquetes pueden influir sobre componentes distintos, o las diferencias observadas pueden reflejar la variación inherente al experimento. El diseño no identifica el mecanismo causal y la comparación de letras debe leerse dentro de sus propios límites. El argumento editorial consiste en preservar la complejidad del registro en lugar de uniformarlo artificialmente.

La masa de cien granos ofrece una tercera perspectiva. El testigo registró 57,00 g; T1, 61,50 g; T2, 65,00 g; y T3, 61,25 g. El análisis de varianza informó F = 11,68 para tratamientos, clasificado como altamente significativo, y CV de 3,13 %. Duncan al 5 % situó a T2 en grupo «a», T1 y T3 en «b» y T0 en «c». Este patrón, diferente del observado para granos por vaina, indica que el tratamiento asociado con el mayor peso individual promedio del grano fue T2 dentro de las condiciones ensayadas.

Tabla 18. Promedios de peso de 100 granos

Tratamiento	Masa (g)	Grupo Duncan, 5 %
T0	57,00	c
T1	61,50	b
T2	65,00	a
T3	61,25	b

Fuente: Pantoja Medina et al. (2026), manuscrito académico proporcionado; transcripción fiel de las cifras reportadas.

La masa del grano se vincula con el llenado, pero el experimento no midió fotosíntesis, remobilización de nutrientes ni número de días de llenado. La interpretación fisiológica, por tanto, requiere apoyarse en literatura general y permanece como hipótesis explicativa, no como observación directa. Estudios sobre estrés hídrico y disponibilidad de nutrientes demuestran que varios factores pueden modificar simultáneamente biomasa y peso de semilla (Smith et al., 2022). El dato local se utiliza para proponer nuevos registros fenológicos, no para reconstruir retrospectivamente procesos fisiológicos ausentes del cuaderno experimental suministrado.

5.4. Producción por área neta y rendimiento por hectárea

La masa de grano cosechada en el área neta de 1,8 m² constituyó el indicador previo a la extrapolación de rendimiento. Los promedios reportados fueron 0,50575 kg para T0, 0,82025 kg para T1, 0,84375 kg para T2 y 0,83550 kg para T3. Duncan al 5 % agrupó a T1, T2 y T3 en una misma categoría y separó al testigo. En términos prácticos, los tratamientos fertilizados mostraron rendimientos por parcela superiores a la condición sin aplicación de los paquetes, aunque las diferencias entre las tres dosis no se identificaron como estadísticamente significativas mediante el procedimiento reportado.

Tabla 19. Producción en el área neta experimental

Tratamiento	Masa promedio (kg)	Grupo Duncan, 5 %
T0	0,50575	b
T1	0,82025	a
T2	0,84375	a
T3	0,83550	a

Fuente: Pantoja Medina et al. (2026), manuscrito académico proporcionado; transcripción fiel de las cifras reportadas.

La tabla de rendimiento por hectárea registra 2 809,50 kg/ha para T0; 4 557,25 kg/ha para T1; 4 687,50 kg/ha para T2; y 4 593,25 kg/ha para T3. El ANDEVA de la fuente presenta F = 18,01 para tratamientos, calificado como altamente significativo, y CV de 10,23 %. Las letras de Duncan al 5 % mantienen a los tres tratamientos fertilizados en el grupo «a» y al testigo en «b». La máxima media numérica de la tabla pertenece a T2, pero la inferencia estadística publicada no distingue entre ese paquete y los otros tratamientos fertilizados. Esta doble lectura —superioridad respecto del control y ausencia de separación entre paquetes— debe mantenerse explícita.

Tabla 20. Rendimiento de grano por hectárea, según la tabla original

Tratamiento	Rendimiento informado (kg/ha)	Grupo Duncan, 5 %
T0	2 809,50	b
T1	4 557,25	a
T2	4 687,50	a
T3	4 593,25	a

Fuente: Pantoja Medina et al. (2026), manuscrito académico proporcionado; transcripción fiel de las cifras reportadas. Los valores se copian de la tabla de rendimiento y no se corrigen a partir de la tabla de masa por parcela.

La diferencia descriptiva entre la media de T2 y el testigo es de 1 878,00 kg/ha, calculada directamente a partir de los dos rendimientos informados. Para T1, la diferencia

respecto de T0 es de 1 747,75 kg/ha; para T3, de 1 783,75 kg/ha. Son restas aritméticas editoriales, no valores obtenidos en una medición adicional ni estimadores independientes de incertidumbre. No se presentan intervalos de confianza nuevos porque la fuente no ofrece aquí un conjunto de supuestos verificados que permita hacerlo de manera trazable. La magnitud de estos contrastes sugiere una respuesta importante de los paquetes completos frente al testigo en ese entorno, y reclama al mismo tiempo una validación multianual antes de formular recomendaciones extensivas.

Tabla 21. Diferencias descriptivas frente al testigo

Tratamiento	Rendimiento reportado	Diferencia con T0 (kg/ha)	Naturaleza
T1	4 557,25	1 747,75	Cálculo editorial
T2	4 687,50	1 878,00	Cálculo editorial
T3	4 593,25	1 783,75	Cálculo editorial

Fuente: Elaboración propia: resta aritmética de los promedios de rendimiento publicados por Pantoja Medina et al. (2026). No constituye nueva prueba estadística.

Un punto crítico de control editorial surge al cotejar masa por área y rendimiento. El promedio informado de T2, 0,84375 kg en 1,8 m², equivale aritméticamente a 4 687,5 kg/ha, en concordancia con la tabla de rendimiento. Para T3, sin embargo, 0,83550 kg en la misma superficie corresponderían a aproximadamente 4 641,67 kg/ha, cifra distinta de los 4 593,25 kg/ha reportados en el cuadro de rendimiento. Esta diferencia no debe corregirse silenciosamente: podrían existir un error de transcripción o criterios no explicitados. Sin acceso a las anotaciones originales, la obra conserva ambos valores en sus tablas respectivas y reconoce la necesidad de cotejo documental antes de reutilizarlos en un análisis cuantitativo secundario.

El caso T1 también exige atención de redondeo al comparar 0,82025 kg por 1,8 m² con la cifra de 4 557,25 kg/ha consignada por la fuente. La proximidad aritmética no autoriza sustituir el número publicado por otro valor reconstruido. El análisis correcto consiste en aclarar el origen de cada cifra y no mezclar promedios publicados con conversiones recalculadas sin identificación. Este criterio resguarda a quienes posteriormente utilicen el material para metaanálisis, revisión sistemática o diseño de ensayos: saben qué valores pertenecen a la investigación base y cuáles proceden de verificación editorial.

5.5. Lectura estadística, trazabilidad y límites del experimento

Los cinco indicadores fueron evaluados con ANDEVA, y el documento presenta para tratamientos F de 10,10, 5,62, 11,68, 18,54 y 18,01, respectivamente, para vainas por planta, granos por vaina, masa de cien granos, masa en área neta y rendimiento por hectárea. Todos fueron interpretados como significativos o altamente significativos según las marcas originales. Sin acceso a una base digital validada por el equipo y a los diagnósticos de residuos, el libro no recalcula p exactos ni modifica la clasificación de significación. Los cuadros cumplen una función de trazabilidad, no de creación de una nueva evaluación estadística.

Tabla 22. Resumen de ANDEVA presentado en el documento original

Indicador	F tratamientos	Declaración original	CV
Vainas/planta	10,10	Altamente significativo	15,57 %
Granos/vaina	5,62	Significativo	4,93 %
Peso/100 granos	11,68	Altamente significativo	3,13 %
Peso/área neta	18,54	Altamente significativo	10,14 %
Rendimiento/ha	18,01	Altamente significativo	10,23 %

Fuente: Pantoja Medina et al. (2026), manuscrito académico proporcionado; transcripción fiel de las cifras reportadas. Los F se consignan tal como fueron reportados.

La principal conclusión respaldada por el conjunto de resultados consiste en que los paquetes completos de fertilización superaron al testigo en indicadores productivos relevantes dentro del experimento. Esta lectura no autoriza inferir un efecto separado de nitrógeno, fósforo o potasio; tampoco permite determinar cuál paquete es económicamente más conveniente ni pronosticar el rendimiento en un terreno distinto. La afirmación sobre superioridad numérica de T2 debe convivir con la ausencia de separación estadística entre T1, T2 y T3 en rendimiento. La precisión de estas distinciones protege la utilidad científica del caso al impedir que las conclusiones excedan la evidencia disponible.

Tabla 23. Cómo interpretar las comparaciones de medias sin sobreextenderlas

Resultado	Hallazgo respaldado	Afirmación no justificada
T0 vs fertilizados	Los paquetes NPK superan el testigo en rendimiento	Una dosis es óptima para cualquier lugar.
T1 vs T2 vs T3	No se distinguen estadísticamente al 5 % para rendimiento	T2 supera estadísticamente a T1 y T3.
Componente granos/vaina	T1 presenta promedio máximo tabulado	T2 logra el máximo de todos los componentes.
Resultado local	Describe un sitio y un material genético	Confirma adopción rentable a escala regional.

Fuente: Elaboración editorial propia, sustentada en las fuentes científicas citadas en los apartados correspondientes; categorías analíticas, no mediciones de campo.

La documentación de procedencia también presenta cuestiones bibliográficas. La portada del archivo cargado consigna 2026 y cinco nombres específicos; el texto introductorio plantea una pregunta situada en Huacrachuco 2010; y la publicación verificable en la revista Alfa, de mayo de 2026, muestra una lista de autores parcialmente distinta. No se dispone de evidencia suficiente para interpretar esas diferencias como versiones equivalentes de una única tesis aprobada para un grado determinado. Por ello se mantienen citas independientes a Pantoja Medina et al. (2026a) para la versión recibida y a Pantoja Medina et al. (2026b) para el artículo identificado mediante DOI. Ningún metadato ausente se asigna por analogía.

Tabla 24. Puntos de verificación de consistencia documental

Elemento	Información en el archivo	Tratamiento editorial
Año	Portada de 2026 y referencia a Huacrachuco 2010	No se adjudica fecha del trabajo de campo.
Autores	Cinco firmas en el archivo cargado	Se diferencia de la versión publicada en 2026.
Granos por vaina	Resumen: 4,28 para T2; tabla: 4,28 para T1	Se da primacía a la tabla desagregada.
Rendimiento T3	Área neta: 0,8355 kg; rendimiento: 4 593,25 kg/ha	Se conserva cada cuadro y se advierte falta de concordancia.
Eficiencia económica	No hay presupuesto de costos ni ventas	No se declara una dosis económicamente óptima.

Fuente: Pantoja Medina et al. (2026), manuscrito académico proporcionado; transcripción fiel de las cifras reportadas. Evaluación crítica editorial de consistencia, sin corregir datos originales.

Finalmente, el diseño aborda un único cultivar en una sola localización experimental, con cuatro bloques. Esta delimitación no invalida el trabajo; define su frontera de inferencia. Los valores meteorológicos mensuales no sustituyen registros de agua disponible, la caracterización edáfica cualitativa no reemplaza concentraciones, y el rendimiento no informa por sí solo sobre rentabilidad. La fortaleza del caso es haber observado contrastes consistentes frente al control dentro de su propio diseño. Su potencial futuro reside en servir como punto de partida para ensayos factoriales, estudios multilocales, análisis de calidad y evaluación de costos, tareas que pertenecen a investigaciones por realizar.

Reconstrucción del caso desde la pregunta agronómica

El ensayo conducido en Cajabamba, distrito de Huacrachuco, permite examinar una pregunta concreta: cómo varía la productividad de una variedad específica de frijol bajo combinaciones crecientes de fertilización mineral y frente a un testigo sin esos aportes. Su valor científico se encuentra en la comparación estructurada, no en representar por sí solo

todos los agroecosistemas de Huánuco. El estudio describe un ambiente de montaña, identifica una localización geográfica y registra rasgos generales del suelo, clima y manejo. Para reutilizar esos resultados como base de un libro autónomo resulta necesario separar la evidencia obtenida de las condiciones particulares de su producción y de las nuevas perspectivas incorporadas por la literatura.

La parcela experimental fue un espacio de observación diseñado para reducir parte de la heterogeneidad del campo. Cada tratamiento apareció en los cuatro bloques; el conjunto produjo 16 unidades de observación independientes para la comparación de fertilización. La tesis consigna 2 496 plantas como población experimental y 480 como muestra procedente de las áreas netas, además de distancias entre surcos y golpes. Estas cifras describen organización y escala del trabajo de campo; no representan un muestreo de todas las parcelas comerciales de Huacrachuco. La distinción importa porque la población estadística de inferencia corresponde principalmente al ambiente experimental y a las condiciones de manejo verificadas.

El diseño incluyó un control y tres alternativas de fertilización completa que aumentaron conjuntamente sus dosis de N, P y K. Las fuentes comerciales fueron urea, superfosfato triple de calcio y cloruro de potasio. El manejo fraccionó nitrógeno entre siembra y cambio de surco, mientras fósforo y potasio se aplicaron al inicio. También se registraron preparación de terreno, siembra, deshierbo, riego y cosecha. Esta información permite contextualizar la respuesta observada, aunque no equivale a un registro exhaustivo de todas las condiciones diarias del cultivo. No se conoce la fecha exacta de cada actividad de campo a partir de la documentación incorporada al libro, salvo los hitos explícitos que la tesis identifica.

La producción y sus componentes se midieron en diferentes escalas. Vainas por planta y granos por vaina describen la estructura reproductiva; el peso de 100 granos aproxima la masa promedio de semilla; la masa por parcela neta conecta la producción con una superficie conocida; el rendimiento por hectárea convierte esa observación a una escala agronómica habitual. Cada variable responde una pregunta particular y puede tener una fuente distinta de variación. Analizarlas conjuntamente permite comprender mejor la respuesta al paquete de fertilización, pero no constituye una demostración mecánica de causalidad entre componentes individuales.

Lectura biológica de los resultados reproductivos

El número de vainas presentó una respuesta visible a los tratamientos. La media de T2 fue 11,875 por planta, seguida de T3 con 10,45 y T1 con 9,625; el testigo registró 6,30. La prueba de Duncan consignó a los tres tratamientos fertilizados en un grupo común, separado del testigo. Es relevante distinguir el orden numérico de la agrupación inferencial: el mayor valor de T2 no autoriza afirmar que superó estadísticamente a T3 o T1 para esta variable. Una lectura fisiológica compatible con el resultado es que mejores condiciones nutritivas pudieron favorecer capacidad de producir o retener estructuras reproductivas, pero el ensayo no permite aislar el nutriente responsable ni medir directamente los procesos que explicaron la diferencia.

En granos por vaina aparece un patrón diferente y una inconsistencia documental especialmente importante. El cuadro de medias y el anexo asignan el primer lugar a T1 con 4,28 granos por vaina; T2 registra 4,13, T0 alcanza 3,85 y T3 obtiene 3,78. Sin embargo, el resumen original atribuye el valor 4,28 a T2. Para la síntesis principal del libro se priorizan los datos tabulares por tratamiento y bloque, porque ofrecen mayor detalle verificable; la discrepancia se declara expresamente sin borrar el texto fuente. Además, no debe confundirse una cifra grande de granos por vaina con una mayor producción total, ya que también intervienen cantidad de vainas, densidad de plantas y masa final.

El peso de 100 granos alcanzó su mayor media en T2, con 65,00 g, mientras T1 y T3 registraron 61,50 y 61,25 g, respectivamente, y el control 57,00 g. La agrupación estadística dependió del nivel de significación empleado: el cuadro de Duncan ubica T2 por encima de otros tratamientos al 5 %, pero lo agrupa con las demás dosis fertilizadas al 1 %. Esta variación muestra por qué es necesario identificar el nivel exacto antes de declarar superioridad. El peso de grano podría relacionarse con el llenado y la capacidad de movilización de asimilados, pero sin mediciones fisiológicas no puede atribuirse a un mecanismo determinado.

El rendimiento surge de una combinación de los componentes reproductivos y del número de plantas que efectivamente participan en la cosecha. Por eso, una variable puede mejorar mientras otra muestra cambios menores o incluso un orden inverso. Los datos de Cajabamba ilustran ese principio: T1 aparece primero en granos por vaina pero no en producción por hectárea, y T2 lidera en peso de 100 granos y rendimiento reportado. Esto no

constituye una contradicción agronómica, sino una señal de que los componentes se compensan de manera variable. La interpretación completa requeriría medir densidad final por parcela y explorar covariación entre variables, datos que no se reconstruyen si no fueron entregados.

Entre la cosecha medida y el rendimiento expresado

La masa de grano procedente de las áreas netas se reportó como 0,50575 kg en T0; 0,82025 kg en T1; 0,84375 kg en T2; y 0,83550 kg en T3. La tabla de rendimiento por hectárea registró 2 809,50; 4 557,25; 4 687,50 y 4 593,25 kg/ha para los mismos tratamientos, respectivamente. Estos valores se transcriben en la obra conservando la precisión decimal de la fuente. La conversión por superficie es una operación aritmética, pero debe efectuarse sobre el área de cosecha y la base de medición definida por el estudio; no corresponde alterar una cifra primaria para forzar concordancia con otra tabla.

Existe una discrepancia relevante en T3. Si se extrapola literalmente 0,83550 kg desde un área neta de 1,8 m², el resultado aritmético es aproximadamente 4 641,67 kg/ha, mientras el anexo de rendimiento consigna 4 593,25 kg/ha. En los demás tratamientos, las relaciones entre ambas tablas muestran aproximaciones compatibles con diferencias de redondeo en algunas celdas. La divergencia en T3 no debe esconderse y tampoco puede resolverse sin consultar registros originales de pesaje, cálculo o transcripción. Para las comparaciones de rendimiento se utilizan los resultados de la tabla de kg/ha tal como fueron publicados, acompañados de una nota de trazabilidad que declara esta limitación.

La tabla por bloques del rendimiento tiene otra virtud: permite apreciar que los resultados no se basan en un único valor por tratamiento. Las cuatro repeticiones incorporaron variaciones dentro de cada alternativa, y esa dispersión contribuyó al cálculo del error experimental. La repetición hace posible comparar medias sin atribuir todo cambio a las diferencias de dosis. Sin embargo, el análisis sigue correspondiendo a las condiciones de un ensayo. La estabilidad en otro año o en otra localidad no puede estimarse a partir de una sola matriz de cuatro bloques, aunque el modelo detecte diferencias entre tratamientos en la campaña analizada.

Las cifras de rendimiento deben comunicarse con unidad y contexto. Hablar de «4,6875 toneladas por hectárea» equivale matemáticamente al valor 4 687,5 kg/ha, pero el

libro distingue esta conversión de la transcripción primaria. Asimismo, un valor experimental no debe presentarse como productividad media observada en fincas de todo el distrito. El rendimiento potencial a escala comercial puede variar por tamaño de terreno, uniformidad de riego, calidad de semilla, manejo fitosanitario y cosecha. La diferencia entre un dato experimental y una expectativa de producción comercial debe permanecer abierta hasta que se disponga de validación participativa y multianual.

La estadística del caso y sus límites de resolución

Los cuadros de análisis de varianza reportaron diferencias entre tratamientos para las variables de productividad, mientras la agrupación entre bloques no alcanzó significación en los cuadros publicados. La interpretación correcta no es que los bloques sean idénticos, sino que no se obtuvo evidencia suficiente de una diferencia sistemática bajo el modelo empleado. A su vez, la significación para tratamientos no prueba que todos difieran entre sí. El contraste de Duncan para rendimiento agrupó T1, T2 y T3 como iguales estadísticamente, separados de T0. Esa es la conclusión inferencial prioritaria para diseñar una recomendación prudente.

El hecho de que T2 haya logrado la mayor media y el mejor resultado en varios componentes admite una descripción agronómica interesante. Pero su diferencia frente a T1 y T3 en rendimiento —130,25 y 94,25 kg/ha, respectivamente— debe verse a la luz de la variabilidad y de los grupos de significación. No sería correcto transformar esas diferencias numéricas en certeza de superioridad. Tampoco cabe construir un intervalo de confianza o un valor p adicional si no se declara el cálculo sobre datos apropiados. La obra conserva las pruebas de la tesis como hechos históricos y reserva el análisis de mecanismos para la discusión sustentada en literatura externa.

El experimento modificó tres nutrientes al mismo tiempo, por lo que la respuesta corresponde a paquetes NPK. No se identifican efectos individuales de N, P y K, ni umbrales críticos de disponibilidad, ni una interacción formalmente estimada entre nutrientes. Los comentarios sobre nitrógeno simbiótico, sorción fosfatada y regulación por potasio proceden de agronomía general y de estudios recientes, no de mediciones directas realizadas en Cajabamba. Esta distinción protege al lector frente a una interpretación frecuente: que un aumento de rendimiento después de aplicar tres fertilizantes demuestra cuál de ellos resultó indispensable. Para responder esa pregunta habría que ampliar el diseño.

La calidad de un estudio histórico no se mide únicamente por cuántas variables incluyó. También importa qué se hizo visible y qué quedó fuera de alcance. La tesis publica organización de parcelas, fuentes de insumos, análisis estadístico y observaciones reproductivas; no incluye curvas de respuesta por nutriente individual, índices directos de eficiencia de adquisición ni presupuesto parcial con costos observados. Esos vacíos no deben rellenarse de forma retrospectiva. Sí pueden servir para definir preguntas útiles: ¿cuánto del beneficio se conserva en un año seco?, ¿cómo cambia según fertilidad inicial?, ¿qué combinación entrega mayor margen neto?, ¿qué efecto tendría una estrategia de inoculación validada localmente?

Integridad editorial y reconstrucción verificable

La transformación intelectual de una tesis en libro exige reconocer sus limitaciones documentales sin desfigurarla. La portada del archivo base identifica una institución y presenta cinco nombres; una publicación de 2026 sobre la misma temática ofrece una nómina parcialmente diferente de autores. Los dos documentos no deben confundirse ni utilizarse para completar silenciosamente los metadatos faltantes del otro. La obra distingue la investigación fuente adjunta de la publicación posterior en sus referencias y citas. Como no se verificó un registro institucional persistente del archivo cargado, no se le atribuyen DOI, URL de repositorio ni grado académico imaginados.

Una dificultad habitual al recuperar investigaciones antiguas es que las unidades, fechas y denominaciones administrativas no siempre se presentan de forma consistente. El análisis debe preservar el lenguaje histórico cuando es esencial para identificar el dato y, al mismo tiempo, explicar su significado contemporáneo de manera separada. Esto es distinto de corregir una cifra sin anotación. Las discrepancias en resultados se pueden presentar como advertencias y solicitudes de cotejo; si en el futuro aparece la base de datos de campo, una revisión documentada podrá resolverlas mediante evidencia primaria. Hasta entonces, la fidelidad académica consiste en declarar lo que se sabe y lo que no se puede saber.

La replicación del caso exigiría disponer de protocolos que detallen semilla, sistema de preparación de suelo, método de aplicación, cronología, registro de riego, condiciones meteorológicas, control de sanidad y procedimiento de cosecha. La información preservada ya constituye un punto de partida significativo, pero el diseño de una nueva campaña no debe completarse con supuestos presentados como memoria histórica. Cada detalle faltante deberá

definirse y fecharse como parte del nuevo protocolo, de manera que la comparación entre períodos sea razonable. Así, el experimento de Cajabamba conserva su carácter de evidencia original y se convierte en plataforma para investigaciones que puedan confirmarlo, matizarlo o delimitar su campo de aplicación.

El valor intelectual de este caso es doble. En el plano productivo, evidencia respuesta del cultivo a tres paquetes de nutrición mineral frente al testigo en las condiciones examinadas. En el plano metodológico, permite observar cómo las decisiones sobre dosis, medición, estadística y trazabilidad condicionan el alcance de una recomendación. Su utilidad más duradera no está en convertir una media experimental en receta universal, sino en mostrar qué conclusiones se sostienen y qué preguntas nuevas merece responder la agronomía de territorios andinos.

Auditoría aritmética de las variables agregadas

La conversión entre escalas exige un procedimiento explícito. Si la masa cosechada se expresa en kilogramos y el área neta en metros cuadrados, el cociente entre masa y superficie permite obtener kg/m²; multiplicarlo por 10 000 expresa el valor como kg/ha. Esta relación es válida solo cuando la masa corresponde realmente al área identificada y cuando no se han aplicado correcciones adicionales por humedad, bordes o pérdidas. La transparencia matemática no convierte una extrapolación de parcela en medición directa de una hectárea; indica cómo se expresa bajo una unidad estándar un resultado obtenido en superficie menor.

Los datos de origen permiten comprobar varias relaciones. Para T0, 0,50575 kg divididos entre 1,8 m² y multiplicados por 10 000 producen aproximadamente 2 809,72 kg/ha, cercano a los 2 809,50 publicados. En T1, 0,82025 kg corresponde a unos 4 556,94 kg/ha, frente a 4 557,25 reportados. T2, con 0,84375 kg, conduce exactamente a 4 687,50 kg/ha. En T3, por el contrario, la misma operación con 0,83550 kg genera alrededor de 4 641,67 kg/ha y no los 4 593,25 del cuadro original. Estas operaciones son auditorías aritméticas nuevas realizadas sobre los valores tabulados, no reemplazos de mediciones. Las pequeñas diferencias en T0 y T1 podrían involucrar redondeos o precisión del dato, pero no se atribuye ninguna causa específica sin evidencia.

Es importante conservar incluso los decimales aparentemente poco naturales de la fuente. Un promedio de cuatro bloques puede producir cifras con varias posiciones decimales

aunque los instrumentos originales tengan precisión menor. Reducir decimales por presentación puede ser razonable en una gráfica, siempre que la tabla técnica mantenga el dato tal como se recibió. A la inversa, ampliar artificialmente la precisión de un resultado redondeado transmite certeza que el instrumento no justifica. La reconstrucción editorial debe mostrar claramente cuándo un número proviene de un cuadro y cuándo deriva de una operación sobre ese cuadro.

La consistencia de unidades también afecta el análisis estadístico. Un ANDEVA puede calcularse en toneladas por hectárea o en kilogramos por hectárea, produciendo diferentes escalas para sumas y cuadrados medios, mientras las razones F permanecen equivalentes bajo una transformación lineal uniforme. No resulta correcto mezclar una tabla de producción en kg con sumas de cuadrados obtenidas en toneladas sin explicar el cambio. En el documento original la tabla de rendimiento por hectárea y el anexo contienen unidades y escalas que deben leerse conjuntamente. El libro evita fabricar un nuevo ANDEVA con etiquetas distintas y conserva la fuente de las tablas que presenta.

Integridad de una cadena de evidencias

Una afirmación de libro puede apoyarse en observación, cálculo, inferencia o interpretación bibliográfica. La observación es el dato medido en parcela, por ejemplo la masa de granos. El cálculo reexpresa la observación mediante una regla transparente, como la conversión de superficie. La inferencia estadística evalúa diferencias bajo un modelo y supuestos; la interpretación bibliográfica propone mecanismos plausibles o contextos comparativos. Cuando estos niveles se fusionan, el texto puede presentar como prueba causal lo que apenas constituye explicación teórica. La solución editorial consiste en diferenciarlos mediante lenguaje y notas de fuente, no en convertir cada párrafo en una advertencia excesiva.

Las tablas heredadas requieren otro cuidado: el lector debe conocer si fueron copiadas, reordenadas o recalculadas. Una tabla que conserva los promedios originales pero cambia el orden de tratamientos puede rotularse como adaptación, mientras otra que calcula diferencias con el testigo debe identificarse como elaboración propia a partir de datos originales. La atribución correcta no es solo una obligación bibliográfica; ayuda a detectar dónde buscar una cifra si aparecen discrepancias. Los gráficos nuevos del libro siguen esa misma regla y no se presentan como parte del archivo experimental recibido.

La procedencia de la obra tampoco puede simplificarse. La universidad que figura en una portada, la afiliación individual de los investigadores y la revista que publicó posteriormente una versión relacionada son entidades distintas. No es apropiado intercambiarlas ni deducir que toda la información de la publicación posterior pertenece de forma literal al archivo cargado. Para la transformación científica, la portada y el cuerpo del documento se conservan como fuente primaria de lo que afirman, mientras la verificación bibliográfica externa se presenta separadamente. La situación pone de relieve la importancia de identificadores persistentes, autorizaciones claras y metadatos editoriales precisos.

Qué no se puede afirmar sobre la campaña

La documentación disponible no permite establecer qué fracción del nitrógeno absorbido procedió de fertilizante o simbiosis. Tampoco cuantifica tasas de absorción de fósforo, reservas efectivamente utilizadas de potasio ni variación de materia orgánica entre inicio y cosecha. La existencia de un análisis cualitativo de nutrientes no resuelve esas preguntas. Para responderlas serían necesarias mediciones complementarias, controles y, en algunos casos, técnicas específicas de fisiología o química de suelos. El libro puede explicar cómo se estudiarían sin presentarlas como resultados realizados.

El ensayo tampoco permite concluir cuál combinación produjo mayor rentabilidad, ya que no se documentaron los precios efectivos y costos diferenciales requeridos. La dosis de mayor promedio no debe interpretarse como máxima rentabilidad. No se puede afirmar que las diferencias observadas se sostendrán en otra región, otra fecha o con una variedad distinta. Ni siquiera corresponde asumir que se repetirán en la misma parcela bajo una campaña meteorológicamente diferente. Estas delimitaciones son compatibles con reconocer una respuesta productiva clara frente al testigo dentro del experimento original; de hecho, hacen que ese resultado se interprete con mayor exactitud.

En suma, el caso proporciona un conjunto de datos agronómicos útiles y una arquitectura experimental identificable. Su transformación en libro exige fortalecer teoría, contexto y discusión sin alterar los límites del estudio. Documentar las discrepancias no invalida toda la evidencia ni autoriza corregirla arbitrariamente. La contribución sustantiva consiste en demostrar cómo una investigación local puede integrarse en un marco científico contemporáneo y, al mismo tiempo, conservar la diferencia entre lo observado, lo calculado y lo que todavía permanece por investigar.

El estudio de Cajabamba queda así expuesto como evidencia primaria preservada, con resultados que merecen atención y con inconsistencias que se reconocen abiertamente. Esa forma de lectura abre la discusión final: qué aportan investigaciones recientes sobre nutrición, simbiosis y agua a la interpretación de estos hallazgos y cómo podría construirse una recomendación útil sin sacrificar rigor estadístico ni responsabilidad económica.

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN INTEGRADA Y RUTAS PARA LA INTENSIFICACIÓN SOSTENIBLE

El experimento de Cajabamba dialoga con una literatura que ha evolucionado desde las comparaciones simples de dosis hacia el estudio de interacciones entre ambiente, cultivo y manejo. La fertilización sigue siendo una herramienta relevante, pero su eficacia depende cada vez más de diagnósticos localizados y de estrategias que integren agua, biología del suelo y objetivos económicos. La discusión final no busca reemplazar el resultado original por hallazgos obtenidos en otros países o variedades; pretende situarlo en una conversación científica más amplia y convertir sus límites en preguntas productivas para nuevas investigaciones.

6.1. Interpretar una respuesta positiva sin confundir mecanismos

El patrón más robusto del caso es la diferencia entre el testigo y los tres paquetes fertilizados en rendimiento. Esta observación puede interpretarse como evidencia de que, bajo las condiciones experimentales, la oferta de nutrientes asociada a los tratamientos completos estuvo relacionada con una mayor producción de grano. El diseño no identifica cuál componente de N-P-K dominó esa respuesta. En la práctica, los investigadores suelen trabajar con hipótesis de limitación del suelo, pero una hipótesis agronómica no debe confundirse con una prueba causal del efecto individual de un nutriente. Tal distinción resulta indispensable al conectar resultados de la variedad Cápsula con experimentos factoriales y estudios sobre adquisición de nutrientes.

La revisión sistemática de Karavidas et al. (2022) organiza evidencia sobre prácticas agronómicas que intervienen en rendimiento y calidad del frijol. Su lectura invita a considerar fertilización, manejo del agua, densidad, cultivares y otras decisiones como componentes de un sistema. En Cajabamba, el manejo de semilla, riego y labores culturales fue descrito pero no evaluado como factor experimental independiente. Una comparación responsable debe señalar tanto la coincidencia general —la nutrición puede influir en

rendimiento— como la diferencia de escala: las conclusiones de una revisión sobre múltiples condiciones no identifican automáticamente la causa de una respuesta local única.

Kassa y Kifle (2023) evaluaron formulaciones combinadas con una lógica de calibración vinculada al suelo y a las variedades en Etiopía. Su estudio evidencia que el nivel de aplicación debe examinarse junto con condiciones de respuesta y rentabilidad. Esta convergencia es conceptual, no una replicación del ensayo de Huacrachuco: las mezclas contienen nutrientes adicionales, las variedades son otras y los suelos presentan características diferentes. El valor comparativo radica en proponer el siguiente nivel de trabajo para el caso peruano: cuantificar la fertilidad inicial, evaluar formulaciones adaptadas y agregar un presupuesto parcial a la comparación de rendimientos.

Tadesse et al. (2022) exploraron la aplicación integrada de fertilizantes minerales y estiércol, incorporando azufre y boro entre los elementos considerados. Los sistemas integrados pueden resultar útiles cuando existen varias restricciones nutricionales, pero una mayor complejidad de formulación no es sinónimo de eficiencia en todos los contextos. Antes de incorporar micronutrientes o materia orgánica como tratamiento conviene justificar el motivo edáfico y definir con claridad qué pregunta se busca responder. Lo que falta en el archivo de Cajabamba no es necesariamente «más fertilizante», sino un diagnóstico analítico completo y un diseño capaz de relacionar componentes individuales con respuestas específicas.

Chekanai et al. (2018) investigaron respuestas de frijol a nitrógeno, fósforo e inoculación en suelos variables de Zimbabwe; Zamukulu et al. (2023) abordaron densidad y fertilización en suelos Nitisoles de África central. Estos estudios son útiles precisamente porque hacen explícito el papel de condiciones edáficas y agronómicas que el ensayo de Huacrachuco no alteró factorialmente. La contribución comparativa no consiste en copiar sus rendimientos, sino en identificar factores que podrían medirse y controlarse en validaciones peruanas.

La comparación entre investigación aplicada y literatura internacional exige evitar el traslado de cifras absolutas. Los rendimientos que otra variedad alcanza en suelo etíope, brasileño o tropical no constituyen un estándar obligatorio para un cultivar andino. Cambian el número de plantas por superficie, la presión de enfermedades, la duración de la campaña, el agua, las características genéticas y el protocolo de fertilización. Los autores de una

síntesis pueden identificar tendencias generales, pero la extrapolación numérica requiere modelos y covariables que aquí no se encuentran disponibles. Por esa razón este capítulo compara mecanismos y diseños, no pretende construir una clasificación global de rendimientos a partir de estudios heterogéneos.

Tabla 25. Lecturas complementarias de la literatura reciente

Estudio	Eje	Enseñanza para interpretación
Smith et al. (2022)	Déficit hídrico y bajo fósforo	Un estrés puede modificar el efecto del otro.
Karavidas et al. (2022)	Revisión de prácticas agronómicas	Los sistemas de manejo actúan de forma integrada.
Kassa y Kifle (2023)	Calibración y presupuesto parcial	El mejor nivel técnico no es necesariamente el más rentable.
Chen et al. (2023)	Arquitectura radical y fósforo	La adquisición depende también de rasgos vegetales.
Gatabazi et al. (2024)	Inoculación con rizobios	La fertilización mineral no es única vía de aporte de N.
Coelho et al. (2024)	Dinámica NPK y déficit de agua	La demanda varía por cultivar y ambiente.

Fuente: Síntesis analítica de investigaciones citadas individualmente en el capítulo; no comparación estadística entre ensayos.

6.2. Fijación simbiótica y fósforo como agenda de intensificación sostenible

La relación entre fertilización y fijación biológica de nitrógeno introduce una posibilidad de intensificación eficiente. Si un cultivar y una cepa compatible fijan una fracción significativa del nitrógeno requerido, podría reducirse la dependencia de fuentes minerales en condiciones apropiadas. Pero el costo energético de la simbiosis, su sensibilidad al agua y al fósforo y su variabilidad genotípica impiden tratar la inoculación como sustituto automático de la fertilización. Reinprecht et al. (2020) estudiaron el efecto de aplicaciones nitrogenadas sobre la fijación en frijol; Gatabazi et al. (2024) describieron beneficios de un inoculante específico. Los resultados sustentan una línea de investigación, no una equivalencia universal entre inoculación y kilogramos de fertilizante.

Reis et al. (2023) examinaron asociaciones entre fertilización organomineral, Rhizobium tropici y Azospirillum brasilense. Su enfoque reconoce la multiplicidad de mecanismos potenciales —fijación, promoción del crecimiento y cambios de disponibilidad—, cuya contribución solo puede evaluarse con tratamientos y controles adecuados. En un nuevo ensayo de Huacrachuco convendría separar inoculación, nivel de N, disponibilidad de P y ambiente hídrico, manteniendo claros los costos de cada componente.

Sin esa separación, una combinación compleja puede producir más grano, pero dejar desconocida la razón de la mejora y la posibilidad de simplificar el manejo.

Las raíces constituyen otra frontera de investigación. Chen et al. (2023) revisaron cómo los ajustes de arquitectura radical pueden aumentar la adquisición de fósforo bajo condiciones de escasez. Una planta puede responder a la limitación mediante cambios de exploración del suelo, pero estas respuestas varían entre genotipos. La variedad Cápsula fue evaluada con indicadores de cosecha, sin registros de longitud radical, densidad de pelos, nodulación ni absorción de fósforo. Por ello, el vínculo con la fisiología radical se presenta como hipótesis para trabajos futuros. Proponer la medición de raíces permitiría distinguir si un resultado se explica por mayor disponibilidad del nutriente, mayor capacidad de exploración o una combinación de factores.

Las evidencias recientes sobre interacción entre fósforo y microorganismos ofrecen argumentos adicionales para diseños integrados. La respuesta a un inoculante podría cambiar según la disponibilidad de nutrientes y la población de rizobios del suelo; del mismo modo, un suelo con abundante rizobio nativo puede mostrar resultados diferentes de un suelo biológicamente empobrecido. La experimentación necesita registrar esas condiciones. En este sentido, la ausencia de información sobre nódulos en Cajabamba constituye un límite interpretativo y una oportunidad de investigación concreta. La lectura responsable no rellena ese vacío con una supuesta fijación de nitrógeno exitosa.

La sostenibilidad debe evaluarse como resultado, no como etiqueta del tratamiento. Un programa que reduzca fertilizante puede fracasar si deteriora el rendimiento, y uno que eleve producción puede ser económicamente inviable o intensificar pérdidas de nutrientes. El balance relevante comprende rendimiento, costos, estabilidad, disponibilidad de recursos y posibles efectos ambientales. La FAO (2024) propone observar los costos ocultos y beneficios de los sistemas agroalimentarios; ese marco orienta preguntas de evaluación, pero no constituye una medición de impacto ambiental del experimento original. La combinación de productividad y administración responsable de nutrientes requiere datos específicos de cada sistema.

6.3. Agua, clima y respuesta de nutrientes en escenarios variables

Geleta et al. (2024) compararon respuestas fenotípicas y productivas de variedades de frijol bajo diferentes condiciones de humedad de suelo. La variación entre cultivares observada en ese marco refuerza una cautela importante: incluso cuando se estudia una misma especie, la capacidad de respuesta al estrés puede variar ampliamente. Una investigación futura en Huacrachuco podría registrar más de una variedad y separar el efecto de disponibilidad hídrica de las dosis NPK, sin presumir que la variedad Cápsula comparte necesariamente el comportamiento de otros genotipos.

La respuesta al fertilizante debe reinterpretarse cuando el cultivo enfrenta déficit de agua. Smith et al. (2022) examinaron la interacción entre baja disponibilidad de fósforo y sequía en múltiples genotipos de frijol, con efectos sobre biomasa y componentes de rendimiento. Coelho et al. (2024) encontraron variación en la dinámica de acumulación de N, P y K entre cultivares, niveles de disponibilidad hídrica y años agrícolas. Estas investigaciones muestran que las dosis de nutrientes no operan en un ambiente fisiológico fijo. El agua modifica tanto el movimiento de iones en el suelo como la capacidad de la planta para convertir el suministro en crecimiento reproductivo.

La discusión no exige atribuir estrés hídrico al ensayo de Cajabamba. El manuscrito registra riego por gravedad y datos meteorológicos, pero no cuantifica lámina aplicada, humedad disponible o déficit durante fases específicas. Por tanto, cualquier explicación que invoque una sequía determinada en el sitio carecería de base documental. Lo correcto es indicar que el agua representa una variable potencialmente importante cuya medición futura fortalecería la interpretación de respuesta a NPK. Un diseño factorial agua × fertilización, si fuera viable, permitiría distinguir efectos conjuntos con mayor claridad que la comparación única de paquetes bajo riego manejado por necesidad.

La etapa fenológica importa tanto como el total de agua aplicada. Las plantas pueden atravesar periodos en los que una limitación de humedad produce consecuencias desproporcionadas para el número de vainas o el llenado de grano. Un programa orientado a productividad sostenible debería identificar esas ventanas críticas para el material local, registrar intensidad y duración del estrés y comprobar si la fertilización altera la sensibilidad del cultivo. No es necesario suponer que todo riego adicional aumenta rendimiento: el exceso

también puede limitar aireación y favorecer problemas sanitarios. La mejora está en suministrar oportunamente el recurso, no en maximizarlo sin criterio.

Los resultados de Teixeira et al. (2024) sobre silicio, potasio y déficit hídrico evidencian interés científico en estrategias combinadas de nutrición y tolerancia al estrés. Tales hallazgos deben analizarse como específicos de su diseño y cultivar. La investigación en nodulación de da Silva et al. (2024) amplía el problema hacia mecanismos moleculares de respuesta al agua. Estos trabajos son útiles para construir una agenda de preguntas sobre frijol en agroecosistemas andinos, pero no autorizan formular indicaciones agronómicas directas de silicio o inoculantes para la variedad Cápsula sin ensayos locales de respuesta, costo y seguridad.

Las campañas múltiples ayudan a distinguir resultados estables de coincidencias ambientales. Si T2 supera numéricamente a T3 en una campaña, una repetición puede mostrar el mismo orden o invertirlo según variaciones de suelo y clima. La ausencia de una diferencia estadística entre los tratamientos fertilizados en rendimiento advierte que decidir definitivamente entre ellos con una única comparación sería prematuro. Un protocolo multianual debería registrar, al menos, temperatura, precipitación o riego efectivo, humedad de suelo, estado de cultivo y criterios de cosecha, de modo que las variaciones no se atribuyan automáticamente al fertilizante.

6.4. Calidad del grano, costos y transferencia al productor

El rendimiento comercial expresa una parte del valor del producto. La calidad para consumo depende de características físicas, nutricionales y culinarias que no se deducen sin medición. Lisciani et al. (2024) destacan la relevancia de legumbres y frijoles dentro de dietas sostenibles, mientras que Nchanji y Ageyo (2021) sintetizan estudios relacionados con salud humana. La integración de esos enfoques no permite presentar los 65 g por cien granos de T2 como evidencia de mayor contenido proteico o mejor biodisponibilidad de minerales. El dato es una medición de masa y debe conservarse como tal.

La incorporación de calidad de grano a nuevos ensayos puede relacionar fertilización con atributos comerciales. La uniformidad, defectos visibles, humedad de almacenamiento y características de cocción son relevantes para diferentes cadenas de valor; cuando se evalúan objetivos nutricionales, requieren procedimientos analíticos específicos. Es aconsejable

distinguir la condición del grano destinado a consumo de la semilla que debe conservar viabilidad. Un aumento de masa por grano puede ser atractivo para ciertos mercados y no necesariamente para otros. Por lo tanto, la selección de indicadores de calidad debería construirse con agricultores y compradores, sin extrapolar expectativas comerciales al comportamiento de la variedad estudiada.

La elección entre T1, T2 y T3 depende de información económica que no aparece en la fuente primaria. Los tres paquetes fertilizados comparten grupo estadístico para rendimiento, pero implican cantidades diferentes de fertilizantes comerciales según el cuadro original. Esa circunstancia ofrece un motivo claro para examinar presupuestos parciales y márgenes de riesgo, no para declarar de antemano que el tratamiento de menor o mayor insumo será el mejor. Para decidir se necesitan precios de compra reales, mano de obra adicional, transporte, precio de venta, pérdidas y límites de crédito. La falta de esos datos impide concluir rentabilidad o retorno sobre inversión.

La extensión debería distinguir «recomendación para ensayar» y «recomendación validada». En la primera, se propone una alternativa basada en un hallazgo interesante y se establecen condiciones de prueba. En la segunda, existe evidencia suficiente de desempeño en el conjunto de ambientes y productores para los cuales se desea difundir la tecnología. La experiencia de Cajabamba ofrece una primera base para el diseño de validaciones. No debe ser convertida por simple autoridad del libro en un paquete estándar para Huánuco. La credibilidad de la asistencia técnica depende de que cada recomendación indique dónde se probó, con qué cultivar, cómo se midió y qué aspectos siguen inciertos.

Los costos ambientales también tienen una escala local. Las pérdidas por lixiviación, erosión o escorrentía dependen del suelo, la cobertura, la pendiente, el régimen hídrico y el momento de aplicación. No se midieron flujos de nutrientes ni indicadores ambientales en el experimento original; por tanto, la obra no asigna ahorros de emisiones o mejoras de calidad de agua a una dosis concreta. En cambio, propone integrar balance de nutrientes, conservación del suelo y estabilidad productiva en futuros proyectos. Evaluar sostenibilidad implica medir procesos y resultados, y no solo cambiar el lenguaje con el que se presenta una práctica.

Tabla 26. Jerarquía de evidencia para una recomendación técnica

Nivel	Evidencia disponible	Decisión adecuada
Descripción local	Un ensayo en Cajabamba, 16 parcelas	Hipótesis de manejo contextualizada.
Repetición	Mismas dosis en varios ciclos	Estimación de estabilidad temporal.
Multilocalidad	Ensayos en suelo, clima y variedad distintos	Identificación de condiciones de aplicación.
Evaluación financiera	Costos y márgenes reales	Prioridad económica entre paquetes.
Extensión	Participación y aceptación del productor	Ajustes para uso operacional.

Fuente: Elaboración editorial propia, sustentada en las fuentes científicas citadas en los apartados correspondientes; categorías analíticas, no mediciones de campo.

6.5. Agenda de investigación, ética de datos y estrategia territorial

La agenda de investigación más inmediata consiste en confirmar los resultados de campo y resolver discrepancias de registro. Es prioritario disponer de una base verificable que contenga las observaciones por parcela, unidades originales, notas de cosecha y conversiones a hectárea. El desacuerdo entre el resumen y la tabla de granos por vaina, y la falta de concordancia de algunas conversiones de rendimiento, muestran la importancia de esta tarea. La revisión debe ser realizada frente al registro primario, no mediante una corrección inferida solo por conveniencia narrativa. Una edición científica responsable puede documentar problemas, pero no declarar unilateralmente qué medición fue la «verdadera» cuando existen versiones incompatibles.

En una segunda etapa, el diseño podría separar factores. Un factorial que varíe N y P de manera independiente, manteniendo controlado el K, ayudaría a evaluar contribuciones y posibles interacciones; también podrían ensayarse estrategias de inoculación y fraccionamiento cuando exista justificación diagnóstica. La cantidad de parcelas debería responder a un cálculo de precisión y a los recursos disponibles, y la metodología tendría que definir unidad experimental, aleatorización y variables primarias antes de iniciar la campaña. El uso rutinario de ANDEVA y pruebas de medias no reemplaza la reflexión sobre pregunta científica y estructura del diseño.

La validación espacial exige incorporar suelos y ambientes contrastantes, siempre que estén caracterizados. La diversidad de pendiente, textura y disponibilidad de agua que caracteriza la agricultura de montaña ofrece oportunidad para investigar interacciones entre manejo y territorio. Un diseño multilocal puede usar el mismo protocolo, pero requiere registrar los factores que difieren para interpretar heterogeneidad. Si el interés institucional es

generar orientaciones para la provincia de Marañón o para Huánuco, una sola localidad no representa por sí sola toda la población de fincas. Ampliar el espacio de observación transforma un hallazgo situado en una base potencial de recomendación territorial.

La dimensión temporal demanda la misma disciplina. Un solo ciclo no permite evaluar plenamente la estabilidad frente a años secos, húmedos, cálidos o con diferente presión sanitaria. Los registros de meteorología deben guardar fechas y procedimientos de captura; los análisis de suelo deben incluir método y unidades; las prácticas de campo deben documentarse por parcela. La tecnología digital puede ayudar a organizar esta información, pero la calidad depende de la definición de variables y de la integridad de las observaciones. Los datos de mala procedencia no se vuelven fiables por almacenarse en una plataforma sofisticada.

La participación de productores añade pertinencia. Una dosis agronómicamente efectiva debe pasar pruebas de costo, acceso a insumos, facilidad de uso y compatibilidad con el calendario real de labores. Una evaluación participativa bien diseñada registra preferencias y restricciones sin sustituirlas por suposiciones del investigador. La información cualitativa puede coexistir con rendimientos medidos si cada método tiene propósito claro y documentación adecuada. Las decisiones colectivas sobre adopción deben reconocer que diferentes agricultores pueden elegir alternativas distintas por razones legítimas de capital, riesgo y disponibilidad de agua.

Tabla 27. Variables prioritarias en futuros ensayos de validación

Eje	Indicador sugerido	Propósito
Fertilidad	pH, MO, N, P, K y textura por profundidad	Comparabilidad edáfica.
Simbiosis	Nódulos funcionales y fuente de N	Explicar respuestas nitrogenadas.
Agua	Riego, lluvia y contenido hídrico	Separar estrés hídrico de fertilización.
Fenología	Emergencia, floración y madurez	Captar diferencias temporales.
Economía	Insumos, labores, ventas y precio neto	Decisión de adopción.
Ambiente	Repetición entre años y localidades	Extrapolación responsable.

Fuente: Elaboración editorial propia, sustentada en las fuentes científicas citadas en los apartados correspondientes; categorías analíticas, no mediciones de campo.

La ética científica cierra la discusión. Una obra derivada de investigación previa debe reconocer a sus autores, citar exactamente su fuente, diferenciar interpretaciones nuevas y evitar atribuir resultados a una nueva campaña inexistente. Si hay varios documentos relacionados con metadatos incompatibles, la discrepancia debe describirse sin inventar un

repositorio o un grado. Si se construyen tablas editoriales a partir de los datos originales, las leyendas deben reconocer su procedencia. Esta disciplina fortalece tanto la publicación como el trabajo de extensión y abre una posibilidad de revisión transparente cuando el equipo original disponga de nueva documentación.

Del resultado de parcela a una hipótesis de intensificación

El incremento productivo registrado en el ensayo de Cajabamba demuestra que el cultivo respondió a alternativas de fertilización completa bajo el conjunto de condiciones observado. Convertir esa constatación en una estrategia de intensificación sostenible requiere ir más allá de maximizar la cosecha de una parcela durante una campaña. La sostenibilidad incorpora estabilidad temporal, rentabilidad, condición del suelo, eficiencia de nutrientes, riesgos ambientales y posibilidades de adopción. Una recomendación que ignore alguno de esos elementos puede funcionar técnicamente en un ensayo y fracasar en la práctica. Por ello, el capítulo propone entender los resultados como una señal útil de respuesta a la nutrición, cuya aplicación depende de nuevos contrastes y evaluaciones territoriales.

El primer problema de transferencia es la variabilidad del ambiente. Los suelos de una misma región pueden diferir en pH, textura, contenido de materia orgánica, fósforo disponible y reservas de potasio. También cambian pendiente, profundidad efectiva, historia de cultivo y acceso al agua. Una dosis que libera una restricción en suelo de fertilidad baja podría generar beneficios modestos o costos innecesarios en otro con nutrientes suficientes. La recomendación basada en diagnóstico resulta más robusta que la copia de una formulación histórica. El valor de los tratamientos originales reside en proporcionar un rango comparado de paquetes que puede orientar ensayos nuevos, no en fijar una norma regional sin validación.

La segunda dificultad corresponde a la variación entre campañas. Una temporada favorable puede permitir que la planta convierta nutrientes en biomasa y grano con mayor eficacia; una temporada adversa puede desplazar la restricción principal hacia el agua, la temperatura o la sanidad. La estabilidad necesita medirse mediante repeticiones temporales y no inferirse a partir del promedio de cuatro bloques de una sola ejecución. En regiones montañosas con heterogeneidad climática, conviene vincular fechas de siembra y fenología con datos meteorológicos de alta resolución. La literatura de Smith et al. (2022) y Coelho et

al. (2024) respalda la pertinencia de incorporar interacciones nutricionales e hídricas al diseño de futuros estudios.

La tercera dificultad es genética. La variedad Cápsula posee una identidad agronómica propia, pero el desempeño puede modificarse por calidad de semilla y ambiente, y no se dispone de evidencia que permita representar mediante un solo ensayo todas las variedades de frijol común. Las comparaciones multivarietales deben distinguir materiales por nombre, procedencia y atributos relevantes; las diferencias de rendimiento requieren diseño que permita identificar interacción genotipo–ambiente–manejo. La selección de material vegetal puede orientar la productividad tanto como la fertilización. Ninguna extrapolación entre genotipos es automática, incluso dentro de la misma especie.

Las preguntas de una nueva nutrición integrada

La fisiología contemporánea ofrece alternativas para replantear la eficiencia del nitrógeno. El frijol puede asociarse con rizobios, pero la magnitud del beneficio depende de compatibilidad microbiana y condiciones del cultivo. Antes de recomendar inoculantes, sería necesario verificar cepas, dosis, supervivencia, colonización y cambios observables en nódulos y productividad. Un protocolo útil podría comparar paquetes minerales completos con variantes que integren inoculación bajo niveles controlados de nitrógeno. El objetivo no sería declarar anticipadamente que un bioinsumo reemplaza cierta cantidad de fertilizante, sino medir la sustitución posible, si existe, y cuantificar el resultado económico y ambiental.

Gatabazi et al. (2024) y Reis et al. (2023) estudian estrategias vinculadas con inoculación y fertilización en frijol. Su contribución al caso andino es conceptual y metodológica: muestran formas de investigar la complementariedad entre suministro mineral y procesos biológicos. Los resultados no deben importarse en cifras desde otros suelos o materiales genéticos. Una validación en Huacrachuco debería registrar disponibilidad inicial de nutrientes, historia de uso, población microbiana y calidad del inoculante, además de la cosecha. Si la nodulación no se mide, no se puede asignar de forma confiable un mecanismo simbiótico a la respuesta observada.

El fósforo exige una agenda paralela. No basta comparar kilos aplicados si se desconoce su disponibilidad y utilización. Sería útil combinar pruebas de suelo, respuesta de biomasa, análisis de tejido y rasgos de exploración radical; esto permitiría distinguir un

ambiente con deficiencia real de otro donde la forma de colocación o la sequía restringe el aprovechamiento. Chen et al. (2023) aportan bases para investigar el papel de la arquitectura radical y su plasticidad. En sistemas donde el fertilizante fosfatado es costoso o poco accesible, elevar eficiencia de adquisición podría tener valor económico y ambiental, pero cualquier propuesta debe pasar por evidencia local.

El potasio también debe observarse en relación con el agua y con el balance catiónico del suelo. Un aumento de dosis puede ser pertinente cuando existen restricciones comprobadas, pero no debe confundirse con una mejora automática de tolerancia a sequía. La investigación tendría que medir humedad y estado nutricional de la planta para vincular ambos factores. Las relaciones con magnesio y calcio merecen atención en suelos con desequilibrios químicos; de lo contrario, corregir un supuesto déficit podría trasladar la restricción a otro elemento. El criterio general es optimizar el sistema, no la concentración aislada de un nutriente.

Validación multilocal y participación de productores

Una red de ensayos puede organizarse para capturar variación que un solo lote no representa. En lugar de repetir exactamente un protocolo en un ambiente idéntico, el diseño multilocal selecciona deliberadamente suelos y condiciones hídricas contrastantes. Cada localidad necesita al menos una comparación común y un registro mínimo estandarizado, de modo que los resultados puedan combinarse sin borrar diferencias. La aleatorización y replicación deben conservarse dentro de cada sitio; la comparación entre localidades debe reconocer que el sitio introduce otra escala de variación. Este enfoque permite explorar dónde existe respuesta y dónde el beneficio es insuficiente.

El muestreo de localidades debe responder a la pregunta de extensión. Si se desea elaborar una recomendación para un distrito, las fincas participantes no deberían seleccionarse únicamente porque tienen mejor acceso a carretera o parcelas más uniformes. Esas fincas pueden facilitar ejecución, pero podrían representar un segmento poco típico. Conviene documentar características edáficas, tamaño de predio, topografía, disponibilidad hídrica e historial de manejo. La representatividad territorial no se garantiza solo aumentando el número de parcelas; exige elegir sitios que reflejen diversidad relevante y explicar los límites de esa selección.

La participación del agricultor puede mejorar pertinencia de las comparaciones. Sus observaciones sobre facilidad de conseguir insumos, oportunidad de aplicación y riesgo de pérdida aportan información que una medición de rendimiento no captura. Sin embargo, la incorporación de saber local debe distinguir observación, hipótesis y evidencia experimental. Una decisión compartida puede seleccionar qué alternativas merecen ser evaluadas, mientras el diseño técnico determina qué contrastes permitirán interpretar resultados. Este equilibrio fortalece tanto la calidad de la pregunta como la adopción posterior, sin sustituir la disciplina de registro y análisis.

Los ensayos en finca también deben incluir el costo de ejecutar la práctica. Dos dosis próximas pueden producir medias similares, pero requerir números distintos de sacos, traslados o jornales. Una técnica demasiado dependiente de equipamiento difícil de conseguir puede resultar inviable aunque su rendimiento sea elevado. La evaluación de adopción podría recoger disponibilidad de crédito, riesgo comercial, distancia a proveedores, venta por calidad y organización cooperativa. Estos indicadores no constituyen parte del ensayo histórico; forman una agenda de investigación aplicada para trasladar el conocimiento a un sistema productivo real.

Indicadores para la sostenibilidad del cultivo

Un marco de seguimiento integral puede agrupar indicadores en cuatro familias. La primera corresponde a producción: densidad final, vainas, masa de grano, rendimiento y estabilidad entre campañas. La segunda describe recursos: dosis efectivamente aplicadas, fertilidad inicial y residual, calidad del agua y conservación del suelo. La tercera examina economía: costos variables, ingreso neto, precio recibido, pérdidas y exposición al financiamiento. La cuarta aborda adopción y funcionamiento social: acceso a insumos, facilidad de ejecución, capacidades técnicas y aceptación informada. Estos indicadores pueden priorizarse progresivamente según recursos de cada investigación; su propósito es evitar que un valor de kg/ha absorba todas las dimensiones de desempeño.

La eficiencia agronómica de fertilización puede servir como indicador orientativo cuando se conoce el incremento de rendimiento frente a un control y la cantidad de nutriente aplicado. Pero en diseños donde cambian simultáneamente N, P y K no puede atribuirse el cociente a un solo elemento sin supuestos adicionales. Tampoco debe confundirse eficiencia agronómica con recuperación de nutrientes, que requiere cuantificar absorción en tejido y

biomasa. La exactitud conceptual previene comparaciones engañosas entre sistemas. Para el caso de Cajabamba, la obra ofrece diferencias de rendimiento frente a T0 como cálculos transparentes, mientras deja pendientes los indicadores que exigen mediciones no disponibles.

La dimensión ambiental no puede resolverse con una etiqueta. Un fertilizante mineral puede contribuir de manera efectiva al abastecimiento alimentario y, a la vez, generar riesgos de pérdida si se aplica en exceso o con calendario inadecuado. Alternativas orgánicas y biológicas también presentan variabilidad y costos que requieren evaluación. El principio de manejo responsable es adaptar insumos a necesidades reales, reducir desperdicios, cuidar suelo y agua y mantener capacidad productiva. La FAO (2024) propone considerar costos ocultos y efectos de los sistemas agroalimentarios, perspectiva que amplía la evaluación económica sin convertir sus indicadores globales en mediciones del sitio experimental.

La calidad poscosecha merece un lugar en ese marco. Un rendimiento alto puede perder valor si el grano presenta humedad inadecuada, daños físicos, plagas de almacenamiento o falta de uniformidad comercial. El registro de calidad ayuda a conectar fertilización y rentabilidad, aunque la relación causal requerirá mediciones y controles apropiados. Incluir humedad de cosecha, porcentaje de impurezas y calidad del lote permite construir un puente entre rendimiento agronómico y precio de mercado. Como estos indicadores no aparecen completos en la tesis, deben proponerse para campañas nuevas y no imputarse a los autores originales.

Investigación reproducible y construcción de conocimiento acumulativo

La repetición científica comienza antes de sembrar, con un protocolo público que especifique tratamientos, distribución, unidades, mediciones y análisis previstos. La documentación posterior debe conservar desviaciones respecto del plan, eventos imprevistos y archivos primarios. Cuando una publicación solo presenta medias finales, la posibilidad de auditoría es limitada; conservar datos por parcela amplía las opciones de contrastar resultados y detectar errores de transcripción. La continuidad requiere repositorios institucionales estables, identificadores bibliográficos correctos y mecanismos de citación que distingan el trabajo original de sus transformaciones editoriales.

El tratamiento de discrepancias es una práctica de transparencia. En la investigación base, algunas afirmaciones narrativas no coinciden con los cuadros por tratamiento y existe una diferencia entre una masa por área neta y su correspondiente valor por hectárea. Publicar un libro académico exige dejar constancia de esos hechos y no inventar valores de sustitución. En el futuro, una cotejación con cuadernos de campo y planillas de cálculo podría determinar si los problemas obedecen a una transcripción, redondeo o procedimiento distinto. Mientras la causa no esté probada, el lector necesita conocer qué tabla se utilizó para cada análisis y por qué.

La acumulación de evidencia se fortalece cuando los resultados se publican aunque no muestren incrementos espectaculares. Una dosis sin efecto, un inoculante sin respuesta o un tratamiento cuyo costo supera su beneficio son conocimientos valiosos para la toma de decisiones. Seleccionar únicamente las campañas favorables puede producir una percepción inflada de eficacia. Las redes de investigación deben registrar resultados nulos, variación ambiental y problemas de ejecución. La transparencia no es un trámite administrativo: constituye la condición necesaria para que futuros investigadores puedan distinguir efectos consistentes de coincidencias locales.

La oportunidad científica del frijol común reside en reunir seguridad alimentaria, diversidad biológica, fertilidad de los suelos y productividad de unidades pequeñas de producción. Un programa de nutrición integrado podría contribuir en esos cuatro planos si se apoya en diagnóstico, evidencia y aprendizaje. El experimento de Cajabamba demuestra respuesta productiva en un escenario específico y ofrece una base histórica para formular investigaciones más amplias. Su contribución permanece más sólida cuando se la expresa en esos términos que cuando se la eleva indebidamente a recomendación universal.

El horizonte propuesto es una agronomía de decisiones comprobables: medir el suelo antes de definir una dosis, registrar el ambiente para interpretar el resultado, comparar tratamientos mediante diseños apropiados, incorporar economía para evaluar adopción y conservar datos para permitir revisión. En ese marco, la fertilización deja de ser un número aislado y se convierte en una intervención que puede justificarse, adaptarse y corregirse. Las reflexiones finales sintetizan el aporte de la investigación de origen y las condiciones bajo las cuales su transformación en libro contribuye a un conocimiento agronómico acumulativo.

Costos de oportunidad y escalamiento tecnológico

La adopción de fertilización mejorada ocurre bajo recursos limitados. El productor decide entre comprar insumos, invertir en semillas de calidad, mejorar el riego, contratar labores o reservar capital para otros cultivos y necesidades familiares. El costo de oportunidad consiste en el beneficio que se renuncia al elegir una alternativa, y puede ser especialmente relevante cuando el crédito es costoso o el capital de trabajo escaso. Una dosis que exhibe buen promedio agronómico no necesariamente desplaza a otras inversiones si su retorno adicional es incierto. De ahí que la evaluación de fertilizantes deba integrarse en una planificación de finca, no limitarse a mostrar la producción más alta de un cuadro.

El escalamiento de parcela experimental a explotación comercial presenta desafíos. Las parcelas de ensayo suelen manejarse con controles más uniformes y observación intensiva, mientras una finca opera con variación espacial y restricciones de tiempo. Las diferencias en oportunidad de deshierbo, disponibilidad de mano de obra o precisión de aplicación pueden modificar el desempeño. Antes de promover una dosis de forma amplia, es razonable validarla en franjas o parcelas de productores bajo protocolos que permitan comparación real, documentando productividad, costos y obstáculos operativos. La escala de recomendación debería crecer en proporción a la solidez de la evidencia, no únicamente al entusiasmo por un rendimiento puntual.

Las estrategias de extensión pueden diseñarse por etapas. Primero se explica la evidencia histórica y sus límites. Después se identifican fincas donde el diagnóstico sugiera una restricción nutricional comparable. A continuación se comparan opciones de manejo con registro de insumos, producción y calidad. Finalmente se revisan resultados con los participantes y se ajustan decisiones. Este enfoque puede reducir compras innecesarias y favorecer aprendizaje acumulativo. No se debe afirmar que ya se realizó un programa de extensión de esas características en Cajabamba; se trata de una propuesta elaborada a partir de la investigación y de principios generales de validación agronómica.

El acceso a conocimiento también requiere formatos de comunicación diferenciados. Una publicación científica necesita detallar métodos y limitaciones; una ficha técnica para productores puede sintetizar decisiones, siempre que no suprima condiciones de pertinencia. Cuando un resultado no distingue estadísticamente entre tres alternativas fertilizadas, una ficha responsable no debería presentar a la de mayor promedio como ganadora indiscutible. Más bien puede explicar que se observó respuesta positiva frente al testigo y que la elección

específica depende de diagnóstico, costo y confirmación local. Esta comunicación ayuda a evitar que la complejidad científica se convierta en una recomendación falsa por exceso de simplificación.

Balance de nutrientes a largo plazo

Un sistema de cultivo extrae elementos que se incorporaron a la biomasa cosechada. Si los aportes no compensan las extracciones y las pérdidas, ciertas reservas pueden disminuir; si superan persistentemente la demanda, pueden acumularse nutrientes o aumentar riesgos según la química del suelo. Un balance agronómico no se reduce a comparar una sola dosis de fertilizante con una cosecha. Necesita conocer la concentración de nutrientes del material retirado, los residuos que regresan al suelo, aportes orgánicos y transformaciones de las reservas. Esta información permite pensar en productividad sostenida durante varias campañas y no únicamente en la respuesta a un paquete en un año.

Las rotaciones de cultivos pueden modificar la economía de nutrientes y la presión sanitaria. El frijol participa en sistemas donde conviven especies con demandas y patrones radicales diferentes, pero el efecto específico de una rotación depende de manejo de residuos, fijación simbiótica efectiva y otros procesos. No es correcto afirmar que toda leguminosa deja automáticamente una cantidad fija de nitrógeno disponible para el cultivo siguiente. La evaluación requiere medir entradas, salidas y cambios edáficos, idealmente con controles adecuados. Investigar secuencias de cultivo en ambientes andinos podría ampliar el conocimiento aportado por un ensayo exclusivamente centrado en la producción de frijol durante una campaña.

La conservación del suelo adquiere particular relevancia en pendientes. Prácticas para mantener cobertura, controlar escorrentía y proteger estructura podrían mejorar el funcionamiento de raíces y reducir pérdidas de partículas y nutrientes. Su efecto no debe darse por garantizado sin evaluar viabilidad y condiciones locales, pero constituye una dimensión lógica de una estrategia sostenible. El conocimiento de la fertilización se vuelve más útil cuando se articula con manejo físico de suelo y agua; ambas dimensiones determinan qué proporción de los insumos incorporados resulta efectivamente accesible al cultivo.

Prioridades para una segunda generación de experimentos

La primera prioridad científica es separar efectos de nutrientes. Ensayos que omitan N, P o K individualmente, o que varíen un nutriente manteniendo los demás constantes, permitirían identificar restricciones que el diseño histórico no pudo aislar. La segunda consiste en registrar procesos: nodulación, concentración tisular, humedad del suelo, fenología y densidad final. La tercera es ampliar la escala temporal y geográfica, con campañas repetidas y localidades contrastantes. La cuarta integra costos, calidad comercial y riesgos. Esta secuencia no exige resolver todas las preguntas de una vez, pero permite que cada nuevo ensayo aporte una pieza identificable a un programa de investigación mayor.

La investigación también podría explorar la interacción entre fertilización y materiales genéticos. Una variedad puede mostrar alta respuesta ante oferta fosfatada mientras otra sea más eficiente bajo condiciones de baja disponibilidad; comparar estas respuestas exige registrar procedencia y diseñar contrastes apropiados. Del mismo modo, la asociación con rizobios puede variar entre combinaciones de hospedero, cepa y ambiente. Estudios contemporáneos sobre arquitectura radical, simbiosis y estrés hídrico ofrecen hipótesis prometedoras; su utilidad reside en formular ensayos medibles, no en apropiarse de sus efectos numéricos para otro territorio.

Un programa plurianual debería mantener un núcleo de protocolos estables para permitir comparación entre campañas, pero también revisar hipótesis a medida que aparecen evidencias nuevas. Por ejemplo, si los resultados indican que la respuesta depende principalmente de baja disponibilidad de fósforo, la siguiente fase puede concentrarse en fuentes y colocación fosfatada con controles adecuados. Si se detecta una limitación hídrica dominante, el diseño debería integrar manejo de agua antes de ampliar dosis de nutrientes. La ciencia aplicada necesita esa capacidad de corregir su dirección mediante datos, sin convertir un resultado inicial en regla inmutable.

El objetivo final es producir recomendaciones condicionales y auditables. Cada una debería precisar material vegetal, tipo de suelo, disponibilidad de agua, sistema de aplicación, rango de costos y fuerza de evidencia. En lugar de una fórmula universal se construiría un conjunto de decisiones justificadas. Tal resultado honraría la contribución de Cajabamba: una

comparación experimental que mostró respuesta productiva a la fertilización, ofreció cifras concretas y reveló interrogantes capaces de impulsar investigación sobre frijol común adaptada a necesidades de productores andinos.

En consecuencia, el principal mensaje científico no es que la dosis numéricamente superior deba aplicarse en todas partes, sino que la respuesta positiva observada merece validación y explicación mecanística. La productividad sostenible del frijol exige integrar diagnóstico nutricional, agua, genética, microbiología, calidad de grano y economía. El avance real consistirá en crear recomendaciones comprobadas para condiciones delimitadas, capaces de mejorar cosecha e ingresos sin imponer costos innecesarios. El experimento de Cajabamba sirve como origen legítimo de esa conversación y como recordatorio de que toda decisión técnica valiosa comienza con datos bien interpretados.

REFLEXIONES FINALES

La principal contribución de una investigación local no reside en que produzca una cifra capaz de circular sin contexto. Reside en que define un problema verificable, compara alternativas concretas y ofrece datos desde los cuales puede construirse conocimiento acumulativo. En Cajabamba, los tratamientos con fertilización completa N-P-K produjeron rendimientos superiores a los del testigo dentro del diseño evaluado. La semejanza estadística de los tres tratamientos fertilizados enseña, además, que el agricultor y el asesor no deben decidir únicamente por el orden de los promedios: la respuesta productiva necesita leerse junto con variabilidad, costos, condiciones edáficas y riesgo.

Los mecanismos descritos a lo largo del libro muestran por qué no existe una fertilización adecuada en abstracto. El nitrógeno se relaciona con el metabolismo del cultivo y con una simbiosis que puede variar en eficiencia; el fósforo depende de procesos del suelo y de la exploración radical; el potasio participa en el mantenimiento del equilibrio hídrico y fisiológico. La disponibilidad efectiva de cada nutriente se modifica en el tiempo y el espacio. Un suelo y una variedad pueden responder a una combinación; otros exigirán un ajuste diferente. Convertir esta complejidad en recomendación requiere una secuencia disciplinada de diagnóstico, prueba, seguimiento y evaluación, no una mera extrapolación de la dosis que exhibió el máximo numérico.

Las nuevas líneas de investigación sugieren integrar manejo mineral y microbiológico, fisiología del agua y desempeño de la semilla. La evidencia sobre inoculación y nutrición mineral permite diseñar ensayos donde se contraste el aporte de nitrógeno con el desempeño de los simbiontes, mientras que los estudios sobre estrés hídrico aconsejan registrar la disponibilidad de agua al interpretar fertilización. El interés por la calidad nutricional de los granos invita a medir componentes adicionales a la masa cosechada, pero esa ampliación no autoriza atribuir al experimento original variables que no

fueron determinadas. Ciencia acumulativa significa ampliar las preguntas sin reescribir los hechos.

Para las instituciones de formación e investigación se deriva una exigencia editorial: conservar metadatos de origen, protocolos, unidades, cuadernos y anexos; armonizar los cuadros antes de difundir un trabajo; indicar cuándo un indicador fue medido y cuándo se calculó; revisar concordancia entre resúmenes y resultados; y hacer rastreable cualquier cambio de autoría o versión. Las inconsistencias detectadas en el material suministrado quedan expresamente documentadas como asuntos pendientes de cotejo con registros originales. Esa advertencia protege tanto al lector como a quienes participaron en la investigación, sin desacreditar de manera improcedente el esfuerzo de campo.

Un programa de validación responsable para Huacrachuco debería preservar el valor del estudio inicial y, al mismo tiempo, ampliar su alcance: nuevas campañas, repetición en otras parcelas, más materiales genéticos, medición de nodulación y de agua, tratamientos con componentes nutricionales separables, registro de precios y evaluación de calidad. La colaboración con productores puede ayudar a identificar restricciones que un diseño exclusivamente académico no anticipa. La decisión final sobre una tecnología debe expresar claramente para quién resulta adecuada, bajo qué condiciones y con qué márgenes de incertidumbre.

El frijol común ofrece un ejemplo especialmente fértil de integración científica. Su productividad reúne la escala molecular de la fijación de nitrógeno, la escala fisiológica de las raíces y vainas, la escala agronómica de la parcela, la escala territorial del agua y el suelo y la escala social del acceso a alimentos e ingresos. Pensar conjuntamente estas dimensiones no elimina las dificultades prácticas, pero mejora el tipo de preguntas que la agronomía formula. La lección que permanece es sencilla y rigurosa: una cosecha mayor constituye un resultado; comprender por qué ocurre, cuándo es reproducible y si vale la pena producirla de ese modo constituye el verdadero desafío científico.

BIBLIOGRAFÍA

Beebe, S. E., Rao, I. M., Blair, M. W., & Acosta-Gallegos, J. A. (2013). Phenotyping common beans for adaptation to drought. Frontiers in Physiology, 4, 35. https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00035

Broughton, W. J., Hernández, G., Blair, M., Beebe, S., Gepts, P., & Vanderleyden, J. (2003). Beans (Phaseolus spp.)—Model food legumes. Plant and Soil, 252, 55–128. https://doi.org/10.1023/A:1024146710611

Chekanai, V., Chikowo, R., & Vanlauwe, B. (2018). Response of common bean (Phaseolus vulgaris L.) to nitrogen, phosphorus and rhizobia inoculation across variable soils in Zimbabwe. Agriculture, Ecosystems & Environment, 266, 167–173. https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.08.010

Chen, Z., Wang, L., Cardoso, J. A., Zhu, S., Liu, G., Rao, I. M., & Lin, Y. (2023). Improving phosphorus acquisition efficiency through modification of root growth responses to phosphate starvation in legumes. Frontiers in Plant Science, 14, 1094157. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1094157

Coelho, A. P., de Faria, R. T., Lemos, L. B., dos Reis, M. A. M., Filla, V. A., & de Ceita, E. D. R. (2024). What are the impacts of water deficit, cultivars, and agricultural years on the dynamics of nutrient uptake by common bean? Part I: N, P, and K. Journal of Plant Nutrition, 47(2), 205–225. https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2275067

da Silva, H. A. P., Caetano, V. S., Pessôa, D. D. V., Pacheco, R. S., Meneses, C. H. S. G., & Simões-Araújo, J. L. (2024). Unraveling the drought-responsive transcriptomes in nodules of two common bean genotypes during biological nitrogen fixation. Frontiers in Plant Science, 15, 1345379. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1345379

Duncan, D. B. (1955). Multiple range and multiple F tests. Biometrics, 11(1), 1–42. https://doi.org/10.2307/3001478

Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Fund for Agricultural Development, United Nations Children's Fund, World Food Programme, & World Health Organization. (2025). The state of food security and nutrition in the world 2025: Addressing high food price inflation for food security and nutrition. FAO. https://doi.org/10.4060/cd6008en

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). The state of food and agriculture 2024: Value-driven transformation of agrifood systems. FAO. https://doi.org/10.4060/cd2616en

Gatabazi, A., Ndhlala, A. R., Mvondo-She, M. A., & Mpai, S. (2024). Effectiveness of Rhizobium tropici sp. strain UD5 peat biofertilizer inoculant on growth, yield, and nitrogen concentration of common bean. Nitrogen, 5(1), 79–90. https://doi.org/10.3390/nitrogen5010006

Geleta, R. J., Roro, A. G., & Terfa, M. T. (2024). Phenotypic and yield responses of common bean (Phaseolus vulgaris L.) varieties to different soil moisture levels. BMC Plant Biology, 24, 242. https://doi.org/10.1186/s12870-024-04856-5

Gómez, K. A., & Gómez, A. A. (1984). Statistical procedures for agricultural research (2nd ed.). Wiley.

Graham, P. H., & Vance, C. P. (2003). Legumes: Importance and constraints to greater use. Plant Physiology, 131(3), 872–877. https://doi.org/10.1104/pp.017004

Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management (8th ed.). Pearson.

Karavidas, I., Ntatsi, G., Vougeleka, V., Karkanis, A., Ntanasi, T., Saitanis, C., Agathokleous, E., Ropokis, A., Sabatino, L., Tran, F., Iannetta, P. P. M., & Savvas, D. (2022). Agronomic practices to increase the yield and quality of common bean (Phaseolus vulgaris L.): A systematic review. Agronomy, 12(2), 271. https://doi.org/10.3390/agronomy12020271

Kassa, M., & Kifle, T. (2023). Soil test based fertilizer calibration for common bean (Phaseolus vulgaris L.) varieties of the Southern Ethiopia. Applied and Environmental Soil Science, 2023, 9102273. https://doi.org/10.1155/2023/9102273

Lisciani, S., Marconi, S., Le Donne, C., Camilli, E., Aguzzi, A., Gabrielli, P., Gambelli, L., Kunert, K., Marais, D., Vorster, B. J., Alvarado-Ramos, K., Reboul, E., Cominelli, E., Preite, C., Sparvoli, F., Losa, A., Sala, T., Botha, A.-M., & Ferrari, M. (2024). Legumes and common beans in sustainable diets: Nutritional quality, environmental benefits, spread and use in food preparations. Frontiers in Nutrition, 11, 1385232. https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1385232

Marschner, P. (Ed.). (2012). Marschner's mineral nutrition of higher plants (3rd ed.). Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9

Monteiro Filho, A. F., Coelho, A. P., Souza, M. F. P., Bettiol, J. V. T., Souza, E. F. C., & Lemos, L. B. (2022). Common bean yield responses to nitrogen fertilization in Brazilian no-till soils: A meta-analysis. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 46, e0220022. https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220022

Mortinho, E. S., Jalal, A., Oliveira, C. E. S., Fernandes, G. C., Buzetti, S., & Teixeira Filho, M. C. M. (2022). Co-inoculations with plant growth-promoting bacteria in the common bean to increase efficiency of NPK fertilization. Agronomy, 12(6), 1325. https://doi.org/10.3390/agronomy12061325

Nchanji, E. B., & Ageyo, O. C. (2021). Do common beans (Phaseolus vulgaris L.) promote good health in humans? A systematic review and meta-analysis of clinical and randomized controlled trials. Nutrients, 13(11), 3701. https://doi.org/10.3390/nu13113701

Pantoja Medina, B., Sánchez Baldeón, I., Rojas Leandro, N. N., Ponce Escobal, R., & Rojas Flores, V. Y. (2026a). La fertilizacion inorganica y el rendimiento del cultivo de frijol (Phaseolus vulgaris L.) variedad capsula en condiciones agroecológicas Huacrachuco Huánuco [Manuscrito académico facilitado; portada institucional de la Universidad Nacional Hermilio Valdizán, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Académico

Profesional de Agronomía]. Huánuco, Perú. Sin identificador persistente verificable para esta versión.

Pantoja Medina, B., Sánchez Baldeón, I., Rojas Leandro, N. N., Rueda Castro, H. D., & Ramos Mollehuara, E. A. (2026b). Fertilización inorgánica y rendimiento de frijol (Phaseolus vulgaris L.) variedad capsula en Cajabamba, Huacrachuco. Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias, 10(29), 1–15. https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i29.470

Porch, T. G., Beaver, J. S., Debouck, D. G., Jackson, S. A., Kelly, J. D., & Dempewolf, H. (2013). Use of wild relatives and closely related species to adapt common bean to climate change. Agronomy, 3(2), 433–461. https://doi.org/10.3390/agronomy3020433

Reinprecht, Y., Schram, L., Marsolais, F., Smith, T. H., Hill, B., & Pauls, K. P. (2020). Effects of nitrogen application on nitrogen fixation in common bean production. Frontiers in Plant Science, 11, 1172. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01172

Reis, D. R., Teixeira, G. C. S., Teixeira, I. R., Silva, G. R., & Ribeiro, B. B. A. (2023). Organomineral fertilization associated with inoculation of Rhizobium tropici and co-inoculation of Azospirillum brasilense in common bean. Sustainability, 15(24), 16631. https://doi.org/10.3390/su152416631

Smith, M. R., Dinglasan, E., Veneklaas, E., Polania, J., Rao, I. M., Beebe, S. E., & Merchant, A. (2022). Effect of drought and low P on yield and nutritional content in common bean. Frontiers in Plant Science, 13, 814325. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.814325

Soratto, R. P., Fernandes, A. M., Santos, L. A., & Job, A. L. G. (2013). Nutrient extraction and exportation by common bean cultivars under different fertilization levels: I—Macronutrients. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 37(4), 1027–1042. https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400020

Tadesse, A., Shanka, D., & Laekemariam, F. (2022). Short-term integrated application of nitrogen, phosphorus, sulfur, and boron fertilizer and the farmyard manure effect on the yield and yield components of common bean (Phaseolus vulgaris L.) at Alle

Special Woreda, Southern Ethiopia. Applied and Environmental Soil Science, 2022, 2919409. https://doi.org/10.1155/2022/2919409

Teixeira, G. C. M., Gonzalez-Porras, C. V., Ferreira, P. M., Prado, R. M., Oliveira, K. S., Carvalho, L. T. S., & Palaretti, L. F. (2024). Increased absorption and use of nutrients induced by Si is an indicator for tolerance to water deficit in a common bean cultivar cultivated in the field with and without application of K. Frontiers in Plant Science, 15, 1421615. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1421615

Vásquez García, J., & Vilca Valqui, N. C. (2023). Manual de manejo agronómico de frijol en regiones andinas. Instituto Nacional de Innovación Agraria. https://repositorio.inia.gob.pe/items/8939522f-b00b-490f-bb3b-b4039df15527

White, J. W., Valencia, G. C. A., & Gómez de Enciso, C. (1988). Conceptos básicos de la fisiología del frijol. Centro Internacional de Agricultura Tropical. https://cgspace.cgiar.org/items/a567e71f-bb61-4648-843e-ce9f75cbd43c

Zamukulu, P. M., Bagula, E. M., Mondo, J. M., Chuma, G. B., Safina, F. B., & Cishesa, T. H. (2023). Optimization of plant density and fertilizer application to improve biofortified common bean (Phaseolus vulgaris L.) yield on Nitisols of South-Kivu, Eastern D. R. Congo. Heliyon, 9(6), e17293. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17293