

CULTIVO DE CEBADA

(*Hordeum vulgare* L.)

FUNDAMENTOS AGRONÓMICOS Y
TECNOLOGÍAS PARA LA PRODUCCIÓN
SOSTENIBLE



Autores:

Stefani Vanesa Vega Reinel
David Rodrigo Silva García
Sonia Del Carmen Fierro Borja
Nelson Arturo Monar Gavilanez

ISBN 978-9907-0-0543-1

2025

**CULTIVO DE CEBADA
(Hordeum vulgare L.):
FUNDAMENTOS
AGRONÓMICOS Y
TECNOLOGÍAS PARA LA
PRODUCCIÓN SOSTENIBLE**

AUTORES:

STEFANI VANESA VEGA REINEL

DAVID RODRIGO SILVA GARCÍA

SONIA DEL CARMEN FIERRO BORJA

NELSON ARTURO MONAR GAVILANEZ



Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR
Universidad Estatal de Bolívar
Riobamba – Ecuador
Correo: publicaciones@grupobl.com
<https://grupobl.com/libros-investig>
REPOSITORIO



Vega, S.,Silva, D.,Fierro, S.,Monar,N. (2025) Cultivo de cebada (hordeum vulgare l.): fundamentos agronómicos y tecnologías para la producción sostenible. Grupo Editorial BLR.

© Stefani Vanesa Vega Reinel
David Rodrigo Silva García
Sonia Del Carmen Fierro Borja
Nelson Arturo Monar Gavilanez

ISBN: 978-9907-0-0543-1

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

FILIACIONES DE LOS AUTORES

Stefani Vanesa Vega Reinel

Universidad Estatal de Bolívar

Correo Electrónico: stefani.vega@ueb.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2047-97639>

David Rodrigo Silva García

Universidad Estatal de Bolívar

Correo Electrónico: dsilva@ueb.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4696-5240>

Sonia Del Carmen Fierro Borja

Universidad Estatal de Bolívar

Correo Electrónico: sfierro@ueb.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3947-0046>

Nelson Arturo Monar Gavilanez

Universidad Estatal de Bolívar

Correo Electrónico: nmonar@ueb.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8154-6413>



PRÓLOGO

El cultivo de cebada: ciencia, tradición y futuro agrícola

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) representa uno de los pilares fundamentales de la agricultura mundial y constituye un testimonio viviente de la relación milenaria entre la humanidad y los cereales. Como el quinto cereal de mayor producción global, después del trigo, maíz, arroz y sorgo, la cebada no solo ha alimentado civilizaciones durante más de 10,000 años, sino que continúa siendo un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria, la industria cervecera y la producción pecuaria en el siglo XXI.

Este libro surge de la necesidad imperante de consolidar el conocimiento científico y técnico sobre el cultivo de cebada en un texto académico integral, dirigido especialmente a estudiantes universitarios de agronomía y profesionales del sector agropecuario. La obra que el lector tiene en sus manos representa un esfuerzo por tender puentes entre la investigación básica y la aplicación práctica, entre el conocimiento tradicional y las innovaciones tecnológicas, entre los desafíos locales y las perspectivas globales de la producción cerealera.

En el contexto latinoamericano, y particularmente en la región andina, la cebada adquiere una dimensión especial. En Ecuador, por ejemplo, este cultivo forma parte integral de los sistemas productivos de pequeños y medianos agricultores en altitudes que van desde los 2,400 hasta los 3,500 metros sobre el nivel del mar. Sin embargo, enfrentamos una paradoja preocupante: mientras la demanda nacional supera las 60,000 toneladas

anuales, la producción local apenas alcanza las 24,000 toneladas, con rendimientos promedio de 0.83 a 1.5 t/ha, significativamente inferiores al promedio mundial que supera las 6 t/ha en países tecnificados.

Esta brecha productiva no es simplemente una estadística; representa un desafío multidimensional que involucra aspectos genéticos, agronómicos, económicos y sociales. La presente obra aborda sistemáticamente estos desafíos, integrando los avances más recientes en mejoramiento genético, nutrición vegetal, manejo integrado de plagas y enfermedades, y tecnologías de producción sostenible.

Un aspecto particularmente relevante que este libro desarrolla es la aplicación de bioestimulantes y fertilizantes foliares en la producción de cebada. Las investigaciones recientes han demostrado que productos como el calcio-boro pueden incrementar significativamente los rendimientos, alcanzando hasta 4,832 kg/ha en condiciones óptimas de manejo. Estos hallazgos no solo representan avances técnicos, sino oportunidades concretas para mejorar la rentabilidad y sostenibilidad de los sistemas productivos.

El enfoque pedagógico adoptado en esta obra busca equilibrar el rigor científico con la claridad expositiva. Cada capítulo ha sido estructurado para facilitar el aprendizaje progresivo, partiendo de los fundamentos botánicos y fisiológicos del cultivo, avanzando hacia aspectos más complejos de manejo agronómico, y culminando con análisis económicos y perspectivas futuras. Los estudios de caso, basados en investigaciones realizadas en diferentes zonas agroecológicas, proporcionan al lector una visión práctica de la aplicación de los conceptos teóricos.

Es importante destacar que este libro no pretende ser una receta única para el éxito en el cultivo de cebada. La agricultura, como ciencia aplicada, requiere la adaptación constante del conocimiento a las condiciones específicas de cada región, cada parcela y cada temporada. Lo que sí ofrece esta obra es un marco conceptual sólido, herramientas analíticas probadas y criterios técnicos fundamentados que permitirán al lector tomar decisiones informadas en el manejo del cultivo.

En un mundo que enfrenta el cambio climático, la degradación de recursos naturales y la creciente demanda de alimentos, el cultivo eficiente y sostenible de cereales como la cebada cobra una importancia renovada. Los futuros profesionales de la agronomía tienen ante sí el desafío y la oportunidad de transformar los sistemas productivos tradicionales, incorporando innovaciones tecnológicas sin perder de vista la sabiduría acumulada por generaciones de agricultores.

Invito al lector a adentrarse en estas páginas con espíritu crítico y mente abierta, reconociendo que el conocimiento aquí presentado es parte de un continuo proceso de construcción científica. Que este libro sirva no solo como fuente de información, sino como catalizador de nuevas preguntas, investigaciones y aplicaciones que contribuyan al desarrollo sostenible de la agricultura cerealera en nuestra región.

La cebada, ese grano dorado que ha acompañado a la humanidad desde los albores de la agricultura, continúa ofreciéndonos lecciones sobre adaptación, resiliencia y productividad. Corresponde a las nuevas generaciones de agrónomos escribir el próximo capítulo de esta historia milenaria, armados con el conocimiento científico y el compromiso social

necesarios para enfrentar los desafíos del presente y construir un futuro más próspero y sostenible.

ÍNDICE

PRÓLOGO	i
ÍNDICE	v
INTRODUCCIÓN	xxiii
CAPÍTULO I	31
1 INTRODUCCIÓN AL CULTIVO DE CEBADA	31
1.1 Panorama de la producción global.....	32
1.1 Diversidad de usos y aplicaciones	33
1.2 Características nutricionales y funcionales.....	34
1.3 La cebada en América Latina: Contexto y perspectivas	35
1.3.1 Situación productiva regional	36
1.3.2 Desafíos y oportunidades.....	36
1.4 Situación del cultivo en Ecuador	37
1.4.1 Caracterización del sistema productivo nacional	38
1.4.2 Desarrollo varietal y mejoramiento genético.....	39
1.4.3 Déficit productivo y dependencia externa	40
1.5 Seguridad alimentaria y rol en la agricultura familiar	40

1.5.1	Sistemas de agricultura familiar	41
1.5.2	Género y juventud rural	43
1.6	Mercados y cadenas de valor	43
1.6.1	Estructura de la cadena de valor	43
1.6.2	Formación de precios y márgenes	45
1.6.3	Iniciativas de agregación de valor	45
1.6.4	Perspectivas de mercado	46
1.7	Conclusiones del capítulo	47
CAPÍTULO II		49
2	ORIGEN, TAXONOMÍA Y DIVERSIDAD GENÉTICA.....	49
2.1	Teorías sobre los procesos de domesticación	52
2.2	Clasificación taxonómica.....	54
2.2.1	El Género Hordeum.....	55
2.2.2	Subespecies y variedades botánicas.....	56
2.2.3	Clasificación agronómica	57
2.3	Evolución y domesticación.....	58
2.3.1	El Proceso de domesticación	59

2.3.2	Bases genéticas de la domesticación	61
2.3.3	Domesticación en el contexto Andino	62
2.4	Diversidad genética y recursos fitogenéticos	63
2.4.1	Conservación de recursos Fitogenéticos.....	64
2.4.2	Caracterización de la diversidad.....	65
2.4.3	Análisis de la diversidad genética global.....	66
2.4.4	Recursos genéticos para el mejoramiento.....	67
2.5	Variedades tradicionales y mejoradas	68
2.5.1	Desarrollo de variedades mejoradas	69
2.5.2	Variedades mejoradas en Ecuador	71
2.5.3	Variedades introducidas y su adaptación	72
2.5.4	Estrategias de mejoramiento participativo.....	73
2.5.5	Desafíos y perspectivas.....	74
2.6	Conclusiones del capítulo	75
CAPÍTULO III.....		77
3	MORFOLOGÍA Y ANATOMÍA	77
3.1	Sistema radicular	78

3.1.1	Desarrollo y distribución	78
3.1.2	Distribución espacial y profundidad	79
3.1.3	Implicaciones agronómicas	80
3.2	Tallo y macollos.....	80
3.2.1	Estructura del tallo principal.....	80
3.2.2	Macollamiento	82
3.2.3	Importancia agronómica del macollamiento	83
3.3	Hojas: estructura y función	83
3.3.1	Anatomía foliar.....	84
3.3.2	Filotaxia y desarrollo	84
3.3.3	Funciones fisiológicas	84
3.4	Inflorescencia y flores.....	85
3.4.1	La espiga.....	85
3.4.2	Organización de las espiguillas.....	86
3.4.3	Estructura floral	86
3.4.4	Biología floral.....	87
3.5	Grano: estructura y composición.....	87

3.5.1	Morfología externa	87
3.5.2	Anatomía del grano.....	89
3.5.3	Composición química	90
3.6	Características distintivas entre variedades	91
3.6.1	Criterios morfológicos de diferenciación	91
3.6.2	Variedades tradicionales vs. modernas	91
3.6.3	Implicaciones para el manejo	92
3.7	Conclusiones del capítulo	92
CAPÍTULO IV		95
4	FISIOLOGÍA Y DESARROLLO	95
4.1	Germinación y emergencia	96
4.1.1	Factores que afectan la germinación.....	97
4.1.2	Fisiología de la Emergencia.....	98
4.2	Fase vegetativa: Plántula y macollamiento.....	98
4.2.1	Macollamiento	99
4.2.2	Desarrollo del sistema radicular	100
4.3	Fase reproductiva: Encañado y espigamiento.....	100

4.3.1	Espigamiento	102
4.4	Floración y polinización	102
4.4.1	Proceso de floración	102
4.4.2	Duración y condiciones óptimas.....	103
4.5	Formación y llenado del grano	104
4.5.1	Desarrollo inicial del grano	104
4.5.2	Fases del llenado de grano	104
4.5.3	Factores limitantes	105
4.6	Madurez fisiológica y comercial	106
4.6.1	Madurez fisiológica	106
4.6.2	Madurez comercial	107
4.7	Fenología y escalas de desarrollo	107
4.7.1	Importancia de las escalas fenológicas	107
4.7.2	Duración del ciclo.....	107
4.7.3	Períodos críticos para el rendimiento	108
4.8	Conclusiones del capítulo	109
	CAPÍTULO V.....	111

5	REQUERIMIENTOS EDAFOCLIMÁTICOS.....	111
5.1	Zonas agroecológicas aptas	113
5.1.1	Clasificación global de zonas cerealeras	113
5.1.2	Zonificación agroecológica en América Latina.....	114
5.1.3	Zonificación específica en Ecuador.....	115
5.2	Requerimientos climáticos.....	117
5.2.1	Temperatura	117
5.2.2	Precipitación y balance hídrico.....	120
5.2.3	Radiación solar y fotoperiodo.....	122
5.2.4	Altitud.....	124
5.3	Requerimientos edáficos.....	126
5.3.1	Textura y estructura	126
5.3.2	pH y fertilidad.....	128
5.3.3	Drenaje y salinidad	130
5.4	Adaptación al cambio climático	133
5.4.1	Escenarios climáticos futuros	133
5.4.2	Estrategias de adaptación.....	136

5.4.3	Herramientas de monitoreo y predicción.....	138
5.5	Conclusiones del capítulo	140
CAPÍTULO VI.....		141
6	ESTABLECIMIENTO DEL CULTIVO	141
6.1	Selección del terreno.....	142
6.1.1	Características edáficas ideales.....	143
6.1.2	Consideraciones topográficas	144
6.1.3	Historia del lote y rotación de cultivos	145
6.2	Preparación del suelo	146
6.2.1	Labranza convencional	146
6.2.2	Labranza mínima y siembra directa.....	148
6.3	Época de siembra	151
6.3.1	Factores determinantes	152
6.3.2	Épocas recomendadas por región	154
6.4	Densidad y arreglo espacial.....	155
6.4.1	Densidad óptima de plantas	155
6.4.2	Cálculo de la densidad de siembra.....	155

6.4.3	Arreglo espacial	156
6.5	Profundidad de siembra	156
6.5.1	Profundidad óptima	157
6.5.2	Factores de ajuste.....	157
6.5.3	Consecuencias del mal manejo	157
6.6	Métodos de siembra.....	158
6.6.1	Siembra al voleo	158
6.6.2	Siembra en líneas.....	159
6.6.3	Siembra aérea.....	161
6.7	Calidad de semilla.....	161
6.7.1	Componentes de la calidad	162
6.7.2	Tratamiento de semilla.....	163
6.7.3	Almacenamiento y conservación.....	164
6.7.4	Pruebas de calidad	164
6.8	Conclusiones del capítulo	165
CAPÍTULO VII		168
7	NUTRICIÓN Y FERTILIZACIÓN	168

7.1	Requerimientos nutricionales	168
7.2	Diagnóstico de la fertilidad del suelo	171
7.3	Macronutrientes primarios (N, P, K).....	172
7.4	Macronutrientes secundarios (Ca, Mg, S)	173
7.5	Micronutrientes esenciales.....	174
7.6	Programas de fertilización	176
7.7	Fertilización foliar y bioestimulantes	177
7.8	Manejo integrado de la nutrición	178
7.9	Conclusiones del capítulo	180
CAPÍTULO VIII.....		184
8	MANEJO DEL AGUA.....	184
8.1	Balance hídrico del cultivo	185
8.1.1	Conceptos fundamentales	185
8.1.2	Requerimientos hídricos de la cebada	186
8.1.3	Coefficiente de Cultivo (Kc).....	188
8.1.4	Evapotranspiración del cultivo	189
8.2	Períodos críticos.....	189

8.2.1	Identificación de etapas sensibles al déficit hídrico	189
8.2.2	Efectos del estrés hídrico	192
8.3	Sistemas de riego	193
8.3.1	Riego por superficie.....	193
8.3.2	Riego por aspersión	194
8.3.3	Riego por goteo.....	195
8.3.4	Selección del sistema de riego.....	195
8.4	Programación del riego.....	196
8.4.1	Métodos de programación	196
8.4.2	Criterios de riego	197
8.4.3	Frecuencia y dosis de riego.....	198
8.4.4	Herramientas de monitoreo.....	198
8.5	Eficiencia en el uso del agua	199
8.5.1	Indicadores de eficiencia	199
8.5.2	Estrategias para mejorar la eficiencia	199
8.5.3	Riego deficitario controlado	201
8.6	Manejo en condiciones de secano.....	201

8.6.1	Caracterización de sistemas de secano	201
8.6.2	Técnicas de conservación de humedad.....	202
8.6.3	Ajustes en el manejo agronómico.....	203
8.6.4	Variedades para secano	204
8.6.5	Análisis de riesgo y toma de decisiones	204
8.7	Conclusiones del capítulo	205
CAPÍTULO IX.....		207
9 MANEJO DE MALEZAS EN EL CULTIVO DE CEBADA...		207
9.1	Principales malezas en cebada.....	208
9.1.1	Clasificación de malezas.....	208
9.1.2	Especies problemáticas comunes.....	209
9.1.3	Biología y ecología de las malezas	210
9.2	Períodos críticos de competencia.....	211
9.2.1	Concepto y determinación	211
9.2.2	Factores que afectan el PCC	211
9.2.3	Umbral económico de daño	212
9.3	Control preventivo y cultural.....	213

9.3.1	Medidas preventivas	213
9.3.2	Prácticas culturales	214
9.4	Control mecánico.....	215
9.4.1	Métodos de control mecánico.....	215
9.4.2	Momento óptimo de intervención.....	216
9.5	Control químico: Herbicidas selectivos.....	217
9.5.1	Principios del control químico.....	217
9.5.2	Herbicidas recomendados.....	217
9.5.3	Tecnología de aplicación	219
9.6	Manejo Integrado de Malezas (MIM).....	220
9.6.1	Concepto y principios	220
9.6.2	Componentes del MIM en Cebada	221
9.6.3	Manejo de la resistencia a herbicidas	222
9.6.4	Evaluación económica del MIM.....	223
9.6.5	Sostenibilidad del sistema.....	223
9.7	Conclusiones del capítulo	224
	CAPÍTULO X.....	226

10	PLAGAS DEL CULTIVO	226
10.1	Plagas del suelo.....	227
10.1.1	Gusano alambre (Agriotes spp.)	227
10.1.2	Nematodos fitoparásitos (Heterodera avenae).....	228
10.1.3	Gusanos blancos (Phyllophaga spp.)	229
10.2	Plagas del follaje.....	230
10.2.1	Pulgones o áfidos.....	230
10.2.2	Trips (Thrips spp.)	231
10.2.3	Chinches (Nezara viridula, Dichelops furcatus).....	232
10.3	Plagas de la espiga y grano	232
10.3.1	Complejo de chinches.....	232
10.3.2	Gorgojos de almacén	233
10.4	Monitoreo y umbrales de daño	234
10.4.1	Técnicas de monitoreo	234
10.4.2	Umbrales de daño económico.....	235
10.5	Control biológico	236
10.5.1	Enemigos naturales	236

10.5.2	Estrategias de conservación.....	237
10.6	Control químico selectivo.....	237
10.6.1	Principios del control químico racional.....	237
10.6.2	Grupos de insecticidas y modos de acción	238
10.6.3	Resistencia y manejo	239
10.7	Manejo integrado de plagas (MIP)	239
10.7.1	Componentes del MIP en cebada.....	239
10.7.2	Implementación práctica del MIP.....	241
10.7.3	Casos de éxito en América Latina	242
10.8	Conclusiones del capítulo.....	243
CAPÍTULO XI.....		245
11 ENFERMEDADES.....		245
11.1	Enfermedades fungosas	246
11.1.1	Royas (amarilla, parda, del tallo).....	246
11.1.2	Oídio (Blumeria graminis f. sp. hordei).....	249
11.1.3	Carbones	250
11.1.4	Enfermedades foliares	251

11.2	Enfermedades bacterianas	252
11.3	Enfermedades virales.....	253
11.4	Epidemiología.....	254
11.5	Resistencia genética.....	255
11.6	Control químico	256
11.7	Manejo integrado de enfermedades	257
11.8	Conclusiones del capítulo	259
CAPÍTULO XII		261
12 BIOESTIMULANTES Y TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN		
.....		261
12.1	Conceptos y clasificación de bioestimulantes	261
12.1.1	Definición y marco conceptual	261
12.1.2	Clasificación de bioestimulantes	262
12.2	Mecanismos de acción.....	263
12.2.1	Acción a nivel celular y molecular	263
12.2.2	Efectos fisiológicos en cebada.....	264
12.3	Bioestimulantes a base de algas marinas	265
12.3.1	Composición y propiedades.....	265

12.3.2	Aplicación en cebada: Caso Seaweed Extract.....	266
12.3.3	Modo de aplicación y momentos críticos	266
12.4	Ácidos húmicos y fúlvicos.....	267
12.4.1	Naturaleza y origen.....	267
12.4.2	Propiedades bioestimulantes en cebada.....	267
12.4.3	Interacción con la nutrición mineral	268
12.5	Aminoácidos y proteínas hidrolizadas.....	268
12.5.1	Fuentes y procesos de obtención	268
12.5.2	Funciones en el metabolismo de la cebada.....	270
12.6	Micronutrientes complejados: Calcio-Boro.....	271
12.6.1	Importancia del complejo Calcio-Boro en cebada.....	271
12.6.2	Resultados experimentales en cebada.....	272
12.6.3	Mecanismos de acción sinérgica.....	273
12.7	Fitohormonas y reguladores de crecimiento	273
12.7.1	Citoquininas en la producción de cebada	273
12.7.2	Auxinas y giberelinas	274
12.7.3	Aplicación práctica y consideraciones.....	275

12.8	Microorganismos benéficos.....	275
12.8.1	Bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR)	275
12.8.2	Hongos micorrízicos arbusculares.....	276
12.8.3	Trichoderma y otros hongos benéficos.....	276
12.9	Evaluación de eficiencia y rentabilidad.....	276
12.9.1	Metodología de evaluación.....	276
12.9.2	Análisis económico.....	277
12.9.3	Factores que afectan la rentabilidad	278
12.9.4	Casos de éxito documentados.....	278
12.10	Conclusiones del capítulo.....	279
	GLOSARIO	281
	BIBLIOGRAFÍA.....	284

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requerimientos nutricionales aproximados de cebada por tonelada de grano producido.....	170
Tabla 2. Rangos críticos de fertilidad del suelo para cebada.	172
Tabla 3. Recomendaciones generales de fertilización (kg/ha)...	173
Tabla 4. Programa de fertilización referencial para cebada maltera (por hectárea).	177
Tabla 5. Bioestimulantes y efectos en cebada.	178
Tabla 6. Valores referenciales de coeficiente de cultivo (Kc) de cebada.	186
Tabla 7. Comparación de rendimientos bajo riego y secano en cebada.	187

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Importancia económica y alimentaria mundial.	32
Figura 2. La cebada en América Latina: contexto y perspectivas.	35
Figura 3. Situación del cultivo en Ecuador.	38
Figura 4. Seguridad alimentaria y rol en la agricultura familiar..	42
Figura 5. Origen y centros de diversidad de la cebada.	50
Figura 6. Clasificación taxonómica de la cebada.	54
Figura 7. Evolución y domesticación de la cebada.....	59
Figura 8. Diversidad genética y recursos fitogenéticos de la cebada.	63
Figura 9. Variedades tradicionales y mejoradas de cebada.....	68
Figura 10. Sistema radicular de la cebada.	78
Figura 11. Tallo y macollos de la cebada.....	81
Figura 12. Inflorescencia y flores de la cebada.	85
Figura 13. Grano: estructura y composición de la cebada.....	88
Figura 14. Germinación y emergencia de la cebada.	96
Figura 15. Fase vegetativa:Plántula y macollamiento en cebada.	99

Figura 16. Fase reproductiva: encañado y espigamiento en cebada.	101
Figura 17. Floración y polinización en cebada.	103
Figura 18. Formación y llenado del grano en cebada.	105
Figura 19. Madurez fisiológica y comercial en cebada.	106
Figura 20. Zonas agroecológicas aptas para la cebada.	112
Figura 21. Temperatura óptima para la cebada.	117
Figura 22. Precipitación y balance hídrico en cebada.	120
Figura 23. Radiación solar y fotoperiodo en cebada.	123
Figura 24. Textura y estructura del suelo para cebada.	126
Figura 25. pH y fertilidad del suelo en cebada.	128
Figura 26. Drenaje y salinidad.	130
Figura 27. Ciclo de absorción de nutrientes en la cebada.	170
Figura 28. Cronograma de fertilización por etapas fenológicas.	177
Figura 29. Manejo integrado de la nutrición (MIN).	179
Figura 30. Deficiencias nutricionales en cebada.	180
Figura 31. Balance hídrico del cultivo de cebada.	185
Figura 32. Períodos críticos del cultivo frente al déficit hídrico.	190

Figura 33. Períodos críticos del cultivo frente al déficit hídrico.	192
Figura 34. Sistemas de riego.....	193
Figura 35. Eficiencia en el uso del agua (EUA) en sistemas de riego.	197
Figura 36. Principales malezas en cebada.	208
Figura 37. Períodos críticos de competencia.	211
Figura 38. Control preventivo y cultural.	213
Figura 39. Control mecánico.	215
Figura 40. Control químico: herbicidas selectivos.	217
Figura 41. Manejo integrado de malezas (MIM).	220
Figura 42. Plagas del suelo en cebada.	227
Figura 43. Plagas del follaje.	230
Figura 44. Plagas de la espiga y grano.....	232
Figura 45. Monitoreo y umbrales de daño.	234
Figura 46. Control químico selectivo.	238
Figura 47. Royas en cebada (comparativa: amarilla, parda y del tallo).	249
Figura 48. Enfermedades bacterianas en cebada.	252

Figura 49. Enfermedades virales en cebada..... 254

Figura 50. Epidemiología en cebada..... 254

INTRODUCCIÓN

La cebada (*Hordeum vulgare L.*) constituye uno de los cereales de mayor importancia histórica, social y económica a nivel mundial. Su domesticación se remonta a los albores de la agricultura en el Creciente Fértil, donde desempeñó un papel fundamental en la transición de sociedades nómadas a sedentarias.

Desde entonces, se ha consolidado como un cultivo estratégico debido a su capacidad de adaptación a diversos ambientes, a sus múltiples usos en la alimentación humana y animal, y a su valor industrial en la elaboración de malta y cerveza. Actualmente, se ubica entre los primeros cinco cereales más producidos globalmente, representando un componente clave en la seguridad alimentaria y en las cadenas agroindustriales de numerosos países.

En el contexto mundial, la producción de cebada ha mostrado cierta variabilidad debido a factores climáticos, económicos y tecnológicos. Si bien Europa concentra la mayor parte de la superficie cultivada y del volumen productivo, en América Latina la cebada constituye un cultivo emergente que responde tanto a la demanda local de consumo directo como a las exigencias de la industria maltera.

En Ecuador, la cebada ocupa un lugar relevante dentro de los cultivos andinos, particularmente en las provincias de la Sierra Central y Norte, donde pequeños y medianos agricultores la cultivan en condiciones de minifundio y sistemas agrícolas tradicionales.

A pesar de su relevancia estratégica, el rendimiento promedio nacional de la cebada se mantiene por debajo de los estándares internacionales, con valores que oscilan entre 0,6 y 1,5 t/ha, frente a los más de 6 t/ha alcanzados en países líderes en producción.

En este escenario, la investigación científica aplicada al cultivo de cebada adquiere un valor determinante. El desarrollo de estudios agronómicos sobre la respuesta del cultivo a bioestimulantes, fertilizantes específicos y prácticas de manejo sostenible ha permitido identificar alternativas que mejoran la eficiencia productiva y la calidad del grano.

Ensayos realizados en la provincia de Bolívar, específicamente en la zona de Laguacoto, han demostrado que el uso de productos como calcio-boro, ácidos húmicos, extractos de algas y citoquininas favorece la división celular, fortalece la pared celular, incrementa la viabilidad del polen y mejora el llenado del grano, lo que repercute positivamente en el rendimiento y en la resistencia frente a condiciones de estrés biótico y abiótico.

Este libro surge, entonces, como una respuesta a la necesidad de compilar, sistematizar y difundir el conocimiento científico y técnico disponible sobre el cultivo de la cebada en Ecuador. La obra aborda de manera integral aspectos relacionados con su origen y taxonomía, morfología y fisiología, requerimientos edafoclimáticos, prácticas de manejo agronómico, nutrición y fertilización, así como las principales plagas y enfermedades que lo afectan. Además, presenta resultados de investigaciones recientes orientadas a la aplicación de bioestimulantes y fertilizantes específicos,

que ofrecen evidencia sobre su impacto en la productividad, la calidad de la semilla y la rentabilidad del cultivo.

De esta manera, el texto no solo constituye un material de consulta académica para estudiantes universitarios de agronomía y ciencias agropecuarias, sino también un instrumento práctico para técnicos, extensionistas y agricultores. Su finalidad es contribuir al fortalecimiento de capacidades en el sector agrícola, promover la adopción de prácticas sostenibles y eficientes, y aportar al mejoramiento de la seguridad alimentaria y a la dinamización económica de las comunidades rurales ecuatorianas.

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN AL CULTIVO DE CEBADA

El cultivo de cebada ha acompañado a la humanidad desde los primeros sistemas agrícolas, y hoy continúa siendo un pilar estratégico para la seguridad alimentaria, la industria cervecera, la producción pecuaria y los sistemas de agricultura familiar. Este capítulo contextualiza su importancia desde una perspectiva global y regional, destacando cómo factores históricos, económicos y tecnológicos han configurado su presencia actual en distintos continentes. Se analizan el panorama productivo mundial, los principales usos alimentarios e industriales, así como la relevancia creciente del cereal en el desarrollo rural de países latinoamericanos.

Asimismo, se examina la situación específica de Ecuador, donde la cebada ha cumplido un rol clave en la agricultura de altura, pero enfrenta desafíos como baja productividad, dependencia de importaciones y limitada articulación con cadenas de valor. Este capítulo ofrece, por tanto, un marco general de comprensión del cultivo, necesario para abordar en los siguientes apartados los fundamentos agronómicos, fisiológicos y tecnológicos que permiten mejorar su manejo y competitividad.

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) constituye uno de los cereales fundamentales en el sistema agroalimentario global, ocupando el cuarto lugar en importancia después del trigo, maíz y arroz. Su relevancia trasciende aspectos meramente productivos, configurándose como un cultivo estratégico tanto para la seguridad alimentaria como para el desarrollo económico de numerosas regiones del mundo (Martin et al., 2025).



Figura 1. Importancia económica y alimentaria mundial.

1.1 Panorama de la producción global

La producción mundial de cebada ha experimentado una evolución significativa en las últimas décadas. Según datos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), la producción global para la campaña 2018/2019 superó los 141 millones de toneladas, representando aproximadamente el 8% de la producción mundial de cereales. Esta cifra refleja la consolidación de la cebada como un cultivo esencial en el contexto agrícola internacional (Brueggeman, 2024).

La configuración espacial de los sistemas productivos refleja la correspondencia entre requerimientos fisiológicos del cereal y las características ambientales prevalentes en cada territorio. El continente europeo aglutina aproximadamente la mitad de la superficie destinada al cultivo y genera cerca de dos tercios del volumen global, con naciones como Rusia, Francia, Alemania y Ucrania liderando las estadísticas productivas. Esta hegemonía en latitudes septentrionales obedece a la convergencia de factores climáticos favorables particularmente regímenes

térmicos moderados y patrones pluviométricos adecuados con tradiciones agrícolas arraigadas y niveles avanzados de desarrollo tecnológico que optimizan la eficiencia de los sistemas cerealeros.

1.1 Diversidad de usos y aplicaciones

La versatilidad de la cebada como materia prima constituye uno de sus principales atributos económicos. El grano presenta múltiples destinos que pueden clasificarse en tres grandes categorías:

Uso alimentario humano: Aunque ha disminuido proporcionalmente en países desarrollados, el consumo directo de cebada continúa siendo relevante en regiones de Asia, África y América Latina. El grano perlado, las harinas y los productos derivados aportan carbohidratos complejos, fibra dietética y proteínas de valor biológico intermedio. El contenido proteico oscila entre 9% y 13%, siendo superior al del maíz y comparable al del trigo, con la ventaja adicional de contener beta-glucanos, compuestos bioactivos con propiedades funcionales para la salud humana (Jiang et al., 2025a).

Industria cervecera y maltera: La producción global se distribuye principalmente en dos destinos comerciales diferenciados. Alrededor del 40% se canaliza hacia la maltería, sector que demanda especificaciones rigurosas: contenido proteico entre 10-11%, elevada proporción amilácea y capacidad germinativa uniforme. Este segmento genera el mayor retorno económico dentro de la cadena de valor y dinamiza flujos comerciales transnacionales significativos.

Alimentación animal: Paralelamente, entre 35% y 40% del volumen se destina a nutrición pecuaria, donde el cereal aporta energía metabolizable y fracciones proteicas esenciales en la formulación de dietas para bovinos, porcinos y aves de corral.

1.2 Características nutricionales y funcionales

La composición nutricional del grano ha suscitado interés renovado en la comunidad científica, particularmente respecto a sus fracciones bioactivas. El cereal completo presenta un perfil nutricional complejo: fracción glucídica que representa 65-72% del peso seco predominantemente almidón, proteínas entre 10-17%, lípidos en proporción minoritaria (2-3%), y fibra dietética total oscilante entre 11-34%. El espectro micronutricional incluye vitaminas del grupo B (tiamina, riboflavina, niacina, piridoxina), tocoferoles, y minerales esenciales como fósforo, potasio, magnesio, hierro, zinc y cobre.

Entre los componentes bioactivos destacan los beta-glucanos (3-8%), polisacáridos no amiláceos localizados primordialmente en endospermo y estructuras parietales celulares, junto con arabinoxilanos, lignanos, tocotrienoles y compuestos fenólicos con capacidad antioxidante. La evidencia científica atribuye a los beta-glucanos efectos hipocolesterolémicos, modulación del metabolismo glucídico y actividad prebiótica, lo cual posiciona al cereal como alimento funcional con potencial preventivo frente a patologías crónicas no transmisibles.

1.3 La cebada en América Latina: Contexto y perspectivas

La llegada de *H. vulgare* al continente americano ocurrió durante la colonización española, cuando las expediciones ibéricas introdujeron germoplasma europeo en los territorios conquistados. El cereal encontró condiciones particularmente favorables en ecosistemas montañosos andinos, donde la altitud, los regímenes térmicos y los patrones fotoperiódicos permitieron su establecimiento exitoso. A lo largo de cinco siglos, este cultivo se ha incorporado estructuralmente en los sistemas productivos tradicionales, arraigándose especialmente en comunidades campesinas e indígenas de la cordillera andina, donde cumple funciones alimentarias, culturales y económicas que trascienden su dimensión meramente agronómica.



Figura 2. La cebada en América Latina: contexto y perspectivas.

1.3.1 Situación productiva regional

La producción de cebada en América Latina presenta características heterogéneas que reflejan la diversidad agroecológica y socioeconómica de la región. Los principales países productores incluyen:

Argentina: Líder regional con aproximadamente 4.5 millones de hectáreas cultivadas y rendimientos promedio de 4.0 t/ha. La producción argentina se orienta principalmente a la exportación de malta y grano forrajero, con un desarrollo tecnológico avanzado y sistemas de producción intensivos.

México: Segundo productor regional con cerca de 300,000 hectáreas, concentradas en los estados de Hidalgo, Tlaxcala y Estado de México. La producción mexicana abastece principalmente a la industria cervecera nacional, con rendimientos variables entre 2.0 y 3.5 t/ha.

Países andinos (Perú, Bolivia, Colombia, Ecuador): Caracterizados por sistemas de producción minifundistas en altitudes entre 2,400 y 3,800 msnm. Los rendimientos son generalmente bajos (0.8-2.0 t/ha), pero el cultivo cumple funciones cruciales en la seguridad alimentaria local y la preservación de agrobiodiversidad.

1.3.2 Desafíos y oportunidades

El cultivo en América Latina enfrenta limitaciones estructurales que erosionan su competitividad sectorial. Las asimetrías tecnológicas entre sistemas intensivos y agricultura campesina generan diferenciales de rendimiento superiores al 300%, evidenciando brechas en acceso a innovaciones agronómicas. La creciente variabilidad climática impacta especialmente sistemas de secano característicos de zonas andinas,

mientras que la atomización productiva y deficiencias infraestructurales obstaculizan la articulación con cadenas de valor formales. Adicionalmente, el acceso restringido a germoplasma mejorado y adaptado localmente limita la expresión del potencial genético del cultivo.

No obstante, se identifican oportunidades estratégicas promisorias. La expansión del segmento cervecero artesanal demanda maltas especializadas y variedades diferenciadas que podrían dinamizar nichos de mercado. Los ecotipos nativos poseen características nutricionales y funcionales únicas susceptibles de valorización comercial. Desde la perspectiva de agricultura climáticamente inteligente, la cebada presenta ventajas comparativas en eficiencia hídrica y capacidad de prosperar en suelos marginales. Finalmente, el desarrollo de circuitos cortos de comercialización posibilita mayor captura de valor agregado por parte de productores primarios, fortaleciendo la sostenibilidad económica de sistemas agrícolas familiares.

1.4 Situación del cultivo en Ecuador

En Ecuador, la cebada representa un cultivo ancestral profundamente arraigado en la cultura agrícola de la Sierra. Su importancia trasciende aspectos productivos, configurándose como elemento fundamental de la dieta tradicional y la identidad cultural de las comunidades indígenas y campesinas. El cultivo se distribuye principalmente en las provincias de Chimborazo (3,325 ha), Pichincha (2,304 ha), Carchi (1,392 ha), Tungurahua (1,206 ha), Cotopaxi (1,105 ha), Imbabura (777 ha), y en menor medida en Azuay, Cañar y Loja (Falconí et al., 2015a).



Figura 3. Situación del cultivo en Ecuador.

1.4.1 Caracterización del sistema productivo nacional

La producción ecuatoriana de cebada presenta características distintivas que reflejan las condiciones agroecológicas y socioeconómicas del país:

Superficie y producción: Ecuador cultiva aproximadamente 10,000-12,000 hectáreas anuales, con una producción total de 24,000 toneladas. Los rendimientos identificados de forma promedio oscilan entre 0.6 y 1.5 t/ha, significativamente inferiores al potencial genético de las variedades disponibles (2.5-4.0 t/ha) (Villacrés et al., 2019).

Sistemas de producción: Predominan los sistemas minifundistas con superficies menores a 2 hectáreas, caracterizados por:

- Uso limitado de insumos externos
- Prácticas agronómicas tradicionales
- Rotación con papa, habas y otros cultivos andinos

- Integración con sistemas pecuarios de pequeña escala

Zonas agroecológicas: El cultivo se desarrolla entre 2,400 y 3,500 msnm, en condiciones de:

- Precipitación: 400-800 mm durante el ciclo
- Temperatura media: 8-15°C
- Suelos: Franco-arenosos a franco-arcillosos, pH 6.0-7.5
- Topografía: Pendientes variables, frecuentemente superiores al 15%

1.4.2 Desarrollo varietal y mejoramiento genético

El Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) ha desarrollado un programa sostenido de mejoramiento genético que ha generado variedades adaptadas a las condiciones locales:

Variedades liberadas:

- INIAP Cañicapa (2003): Rendimiento potencial 3.5 t/ha, alto contenido proteico
- INIAP Palmira 2000: Adaptada a zonas secas, tolerante a sequía
- INIAP Iniap-Alfa 2021: Resistencia mejorada a roya amarilla
- Voyager: Variedad introducida con potencial de 2.5 t/ha

Características priorizadas en el mejoramiento:

- Resistencia a enfermedades (roya amarilla, mancha reticular)

- Precocidad (120-150 días)
- Calidad nutricional e industrial
- Adaptación a estrés hídrico

1.4.3 Déficit productivo y dependencia externa

Ecuador presenta un desequilibrio productivo estructural que genera dependencia de importaciones anuales cercanas a 40,000 toneladas, con erogaciones superiores a 10 millones de dólares. Esta situación refleja tres problemáticas interrelacionadas: la demanda industrial insatisfecha la maltería nacional requiere aproximadamente 60,000 toneladas anuales, las dificultades sistemáticas para alcanzar especificaciones técnicas industriales (contenido proteico inferior a 11.5% y poder germinativo superior a 95%), y costos de producción que superan los 700 dólares por hectárea, erosionando la competitividad frente a cereales importados que ingresan con ventajas económicas derivadas de economías de escala y subsidios agrícolas en países de origen.

1.5 Seguridad alimentaria y rol en la agricultura familiar

La cebada desempeña un papel multidimensional en la seguridad alimentaria, particularmente en comunidades rurales de la región andina:

Disponibilidad alimentaria: El cultivo contribuye directamente a la disponibilidad de alimentos a nivel local, proporcionando:

- Grano para consumo directo (máchica, harinas, sopas)
- Forraje para alimentación animal

- Insumos para preparaciones tradicionales (chicha, coladas)

Estabilidad del suministro: La cebada presenta ventajas adaptativas que contribuyen a la estabilidad productiva:

- Ciclo corto (120-160 días) permite flexibilidad en calendarios agrícolas
- Tolerancia a heladas superior a otros cereales
- Menores requerimientos hídricos (400-600 mm)

Acceso económico: Los sistemas de producción familiar generan:

- Autoconsumo que reduce dependencia de mercados
- Ingresos complementarios por venta de excedentes
- Intercambio en sistemas de reciprocidad comunitaria

1.5.1 Sistemas de agricultura familiar

La producción de cebada en Ecuador está íntimamente ligada a la agricultura familiar campesina, caracterizada por:



Figura 4. Seguridad alimentaria y rol en la agricultura familiar.

Diversificación productiva: Integración en sistemas complejos que incluyen:

- Rotaciones con tubérculos andinos (papa, melloco, oca)
- Asociaciones con leguminosas (habas, arveja, chocho)
- Componente pecuario (ovinos, bovinos, cuyes)

Conocimiento tradicional: Preservación de prácticas ancestrales:

- Selección y conservación de semillas
- Calendario agrícola lunar
- Manejo agroecológico de plagas y enfermedades
- Sistemas de ayuda mutua (minga, ayni)

Resiliencia socioeconómica: La cebada contribuye a:

- Diversificación de riesgos productivos y económicos
- Mantención de tejido social comunitario
- Preservación de identidad cultural

1.5.2 Género y juventud rural

El sistema productivo exhibe dinámicas de género particulares donde las mujeres desempeñan roles activos en siembra, cosecha y procesamiento poscosecha, ejerciendo frecuentemente control sobre reservas de semilla y decisiones de consumo doméstico. Además, constituyen depositarias del conocimiento culinario tradicional y sus formas de transmisión intergeneracional.

No obstante, emergen tensiones demográficas preocupantes: la migración juvenil hacia centros urbanos y el envejecimiento progresivo de la población productora generan déficits en el relevo generacional. Esta situación demanda innovaciones tecnológicas y organizativas que revaloricen la actividad agrícola, mejoren su rentabilidad y resulten atractivas para jóvenes, condiciones indispensables para garantizar la continuidad de estos sistemas productivos tradicionales.

1.6 Mercados y cadenas de valor

1.6.1 Estructura de la cadena de valor

La cadena de valor de la cebada en Ecuador presenta una estructura compleja con múltiples actores y niveles de intermediación:

a) *Eslabón primario (Producción):*

- Aproximadamente 20,000 familias productoras
- Superficie promedio: 0.5-2.0 ha
- Organización: 70% productores individuales, 30% asociados

b) *Eslabón de acopio y comercialización:*

- Intermediarios locales (35-40% del volumen)
- Centros de acopio asociativos (20-25%)
- Compra directa industria (35-40%)

c) *Eslabón de transformación:*

- Industria cervecera (Cervecería Nacional, importa 80% de requerimientos)
- Molinos artesanales (producción de harinas y máchica)
- Industria de balanceados

d) *Eslabón de distribución y consumo:*

- Mercados locales y ferias
- Tiendas especializadas
- Supermercados (productos procesados)

1.6.2 Formación de precios y márgenes

El análisis de formación de precios evidencia asimetrías sustanciales en la distribución del valor agregado. Los productores primarios reciben entre 25 y 35 dólares por quintal (45.36 kg), fluctuación determinada por calidad del grano específicamente humedad e impurezas, estacionalidad diferencial entre períodos de cosecha y escasez y capacidad negociadora individual. Los márgenes de intermediación capturan entre 20% y 35% del precio pagado por productores, mientras que la industria maltera paga 40 a 50 dólares por quintal cuando el material cumple especificaciones técnicas.

Esta estructura de precios refleja limitaciones sistémicas: atomización extrema de la oferta que debilita posiciones negociadoras, infraestructura deficiente de almacenamiento que obliga a ventas inmediatas poscosecha, información asimétrica de mercados que favorece a intermediarios, e inconsistencia en la aplicación de estándares de calidad que genera incertidumbre comercial y dificulta la diferenciación por atributos.

1.6.3 Iniciativas de agregación de valor

Emergen experiencias innovadoras de agregación de valor:

- a) *Diferenciación por calidad:*
- Certificación de semillas
 - Producción orgánica/agroecológica
 - Denominaciones de origen

b) Procesamiento artesanal:

- Elaboración de harinas fortificadas
- Productos de panadería especializada
- Bebidas tradicionales mejoradas

c) Integración vertical:

- Contratos de agricultura por contrato
- Alianzas productor-industria
- Desarrollo de marcas colectivas

1.6.4 Perspectivas de mercado

Las tendencias del mercado sugieren oportunidades emergentes:

a) Mercado interno:

- Crecimiento del consumo de alimentos funcionales
- Revalorización de productos ancestrales
- Desarrollo de la industria cervecera artesanal

b) Mercado externo:

- Nichos para productos orgánicos y de comercio justo
- Potencial exportador hacia países vecinos

- Integración en cadenas regionales de valor

c) *Bioeconomía:*

- Aprovechamiento de subproductos (paja, rastrojo)
- Producción de bioetanol
- Aplicaciones en industria cosmética y farmacéutica

1.7 Conclusiones del capítulo

Hordeum vulgare constituye un cultivo de relevancia estratégica multisectorial cuya importancia trasciende dimensiones exclusivamente productivas. A escala global, ocupa el cuarto lugar entre cereales por volumen, cumpliendo funciones críticas en seguridad alimentaria, industria transformadora y nutrición pecuaria. En América Latina, particularmente Ecuador, el sistema enfrenta limitaciones estructurales brechas tecnológicas, atomización productiva, restricciones de mercado, pero simultáneamente presenta oportunidades vinculadas a valorización de recursos genéticos autóctonos, desarrollo de nichos comerciales diferenciados y fortalecimiento de sistemas agroalimentarios sostenibles.

La comprensión integral de las dimensiones productivas, económicas y socioculturales que contextualizan el cultivo constituye fundamento indispensable para abordar los aspectos técnico-científicos desarrollados en capítulos subsecuentes. Reconocer la heterogeneidad de sistemas desde agricultura empresarial intensiva hasta agricultura familiar campesina resulta esencial para diseñar estrategias tecnológicas apropiadas y políticas públicas efectivas.

La viabilidad futura del cultivo regional dependerá de capacidades para: reducir diferenciales de productividad mediante innovación tecnológica contextualizada, fortalecer organización y articulación asociativa de productores, consolidar cadenas de valor inclusivas económica y ambientalmente sostenibles, valorizar agrobiodiversidad y saberes tradicionales asociados, adaptar sistemas productivos ante variabilidad climática creciente, y capitalizar oportunidades emergentes en bioeconomía y mercados especializados que reconozcan atributos diferenciados de calidad.

CAPÍTULO II

2 ORIGEN, TAXONOMÍA Y DIVERSIDAD GENÉTICA

Comprender el origen evolutivo de la cebada es fundamental para valorar su diversidad genética y su potencial de adaptación frente a nuevas exigencias productivas y ambientales. Este capítulo explora las evidencias arqueobotánicas y genéticas que sitúan su domesticación en las regiones del Creciente Fértil, así como su expansión hacia Europa, África, Asia y América. Se describen los principales linajes silvestres y cultivados, sus características taxonómicas dentro del género *Hordeum* y las rutas de dispersión que dieron lugar a los materiales actuales.

Además, se discute la relevancia de la diversidad genética como recurso estratégico para el mejoramiento varietal, especialmente ante el cambio climático y la necesidad de desarrollar cultivares tolerantes a estrés hídrico, bajas temperaturas y enfermedades emergentes. El capítulo resalta la importancia de conservar variedades tradicionales, bancos de germoplasma y sistemas campesinos de semillas, integrándolos con herramientas modernas de genómica y biotecnología para fortalecer la soberanía alimentaria y la resiliencia productiva.

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) representa uno de los testimonios más antiguos de la relación entre la humanidad y la agricultura, siendo considerada uno de los primeros cereales domesticados junto con el trigo. Los registros arqueológicos más antiguos de cebada cultivada datan de aproximadamente 10,000 años antes del presente, encontrados en yacimientos del Creciente Fértil, región que abarca territorios actuales de

Irak, Siria, Líbano, Israel, Palestina, Jordania y partes de Turquía e Irán (Ravelo et al., 1988).

Los registros arqueobotánicos indican que la domesticación de *H. vulgare* no constituyó un evento único, sino que ocurrió de forma independiente en al menos dos núcleos geográficos diferenciados: la porción occidental del Creciente Fértil, correspondiente al Levante mediterráneo, y su sector oriental en las estribaciones de los montes Zagros. Este proceso de domesticación múltiple y geográficamente desacoplado explica parcialmente la notable amplitud de diversidad genética que caracteriza actualmente a la especie, resultado de presiones selectivas divergentes operando sobre poblaciones ancestrales distintas bajo condiciones ambientales contrastantes.

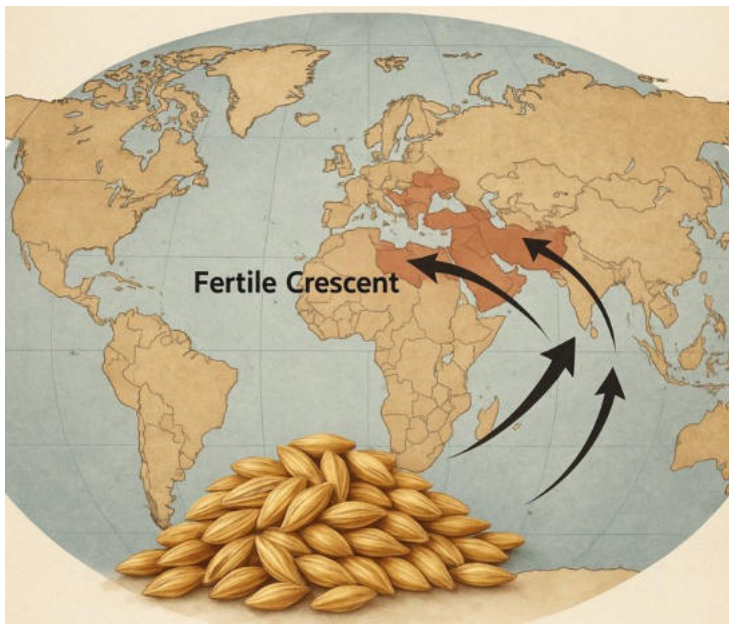


Figura 5. Origen y centros de diversidad de la cebada.

a) *Centros primarios de origen*

El Creciente Fértil constituye el centro primario de origen y diversificación de la cebada cultivada. En esta región, la especie silvestre *Hordeum vulgare* subsp. *spontaneum* (C. Koch) Thell. aún crece de manera natural, representando el ancestro directo de todas las formas cultivadas modernas. Las poblaciones silvestres se distribuyen desde el este del Mediterráneo hasta el Hindu Kush en Afganistán (Jiang et al., 2025b), con particular abundancia en:

- **Región del Levante:** Comprende Israel, Palestina, Jordania, Líbano y Siria occidental, donde se encuentran las poblaciones más diversas genéticamente.
- **Anatolia meridional:** Sur de Turquía, especialmente en las provincias de Gaziantep y Şanlıurfa.
- **Mesopotamia:** Territorios entre los ríos Tigris y Éufrates en Irak.
- **Montañas Zagros:** Cadena montañosa en el oeste de Irán y este de Irak.

b) *Centros secundarios de diversificación*

Posterior a la domesticación primaria, *H. vulgare* experimentó procesos de diversificación secundaria en múltiples regiones, generando reservorios genéticos de importancia estratégica:

Etiopía y Cuerno de África: Este territorio constituye un centro secundario crítico donde evolucionaron formas únicas, incluyendo

variedades de grano desnudo y tipos morfológicos distintivos. El germoplasma etíope exhibe adaptaciones específicas a altitudes elevadas hasta 3,500 metros y tolerancia a estreses múltiples concurrentes.

Asia Central y meseta tibetana: Las regiones montañosas de Asia Central, particularmente el Tíbet, albergan variedades extremadamente adaptadas a altitudes superiores a 4,750 metros, representando el límite altitudinal conocido para cereales cultivados. Estas poblaciones locales, denominadas "qingke", poseen características excepcionales de tolerancia a bajas temperaturas y radiación ultravioleta intensa.

Norte de África y Península Ibérica: El Magreb y la cuenca mediterránea occidental desarrollaron ecotipos específicos para ambientes semiáridos con ciclos productivos invierno-primaverales, caracterizados por eficiencia hídrica y adaptación a suelos calcáreos.

Cordillera Andina: Aunque de introducción colonial reciente (siglo XVI), el espacio andino desde Venezuela hasta Argentina noroccidental ha generado variedades locales adaptadas a condiciones de altura y fotoperíodo ecuatorial. En Ecuador, provincias como Chimborazo, Cotopaxi y Bolívar albergan materiales criollos con características distintivas resultantes de cinco siglos de selección bajo condiciones edafoclimáticas particulares y criterios campesinos de adaptación.

2.1 Teorías sobre los procesos de domesticación

La transición de *H. vulgare* subsp. *spontaneum* a *H. vulgare* subsp. *vulgare* involucró cambios morfológicos y fisiológicos fundamentales conocidos

como el "síndrome de domesticación" (Gutiérrez et al., 2013). Los principales cambios incluyen:

Retención de grano: Las formas silvestres poseen raquis quebradizo que facilita dispersión natural mediante fragmentación espontánea, mientras que materiales domesticados desarrollaron raquis no dehiscente que retiene granos firmemente en la espiga, característica esencial para cosecha mecanizada y minimización de pérdidas.

Incremento de peso seminal: El grano cultivado exhibe masa individual entre 40-60 miligramos, contraste marcado con formas silvestres que oscilan entre 15-25 miligramos, reflejando selección direccional hacia mayor acumulación de reservas y vigor de plántula.

Eliminación de dormancia: Las semillas ancestrales requieren períodos de latencia fisiológica antes de germinar, mecanismo adaptativo contra germinación prematura. Los materiales domesticados perdieron este carácter, germinando inmediatamente bajo condiciones ambientales favorables, lo cual facilita establecimiento uniforme del cultivo, pero incrementa vulnerabilidad a germinación preharvest.

Modificación arquitectural de la inflorescencia: Transición desde espigas dísticas (dos hileras) características de formas primitivas hacia tipos hexásticos (seis hileras) en numerosas variedades cultivadas, cambio que incrementa potencial productivo por unidad de superficie, pero puede comprometer uniformidad de grano y calidad maltera.

2.2 Clasificación taxonómica

La cebada pertenece a la familia Poaceae (Gramineae), una de las familias de plantas con flores más importantes económicamente. Su clasificación taxonómica completa es:

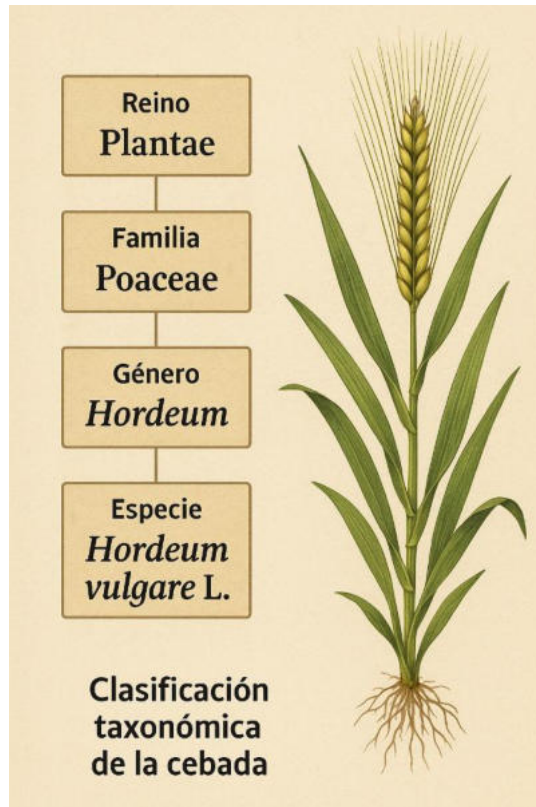


Figura 6. Clasificación taxonómica de la cebada.

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta (Angiospermas)

Clase: Liliopsida (Monocotiledóneas)

Subclase: Commelinidae

Orden: Cyperales (Poales según APG IV)

Familia: Poaceae (Gramineae)

Subfamilia: Pooideae

Tribu: Triticeae (Hordeae)

Género: *Hordeum* L.

Especie: *Hordeum vulgare* L.

2.2.1 El Género *Hordeum*

El género *Hordeum* comprende aproximadamente 32 especies distribuidas en regiones templadas de ambos hemisferios y en las montañas tropicales (Verstegen et al., 2014). Se caracteriza por:

- Espigas con tres espiguillas unifloras en cada nudo del raquis
- Espiguillas laterales frecuentemente reducidas o estériles
- Glumas setáceas ubicadas lateralmente a las espiguillas
- Número cromosómico básico $x = 7$

Las especies del género se clasifican en cuatro secciones principales:

Sección *Hordeum*: Incluye las especies cultivadas y sus parientes silvestres más cercanos, todas diploides ($2n = 14$).

Sección *Anisolepis*: Especies diploides de distribución principalmente asiática.

Sección *Stenostachys*: Especies perennes diploides y poliploides de las Américas.

Sección *Critesion*: Especies principalmente americanas con diversos niveles de ploidía.

2.2.2 *Subespecies y variedades botánicas*

Dentro de *Hordeum vulgare*, se reconocen dos subespecies principales y múltiples variedades botánicas:

a) *Subespecie spontaneum (C. Koch) Thell*

- Forma silvestre ancestral
- Raquis frágil (desarticulación natural)
- Espiga de dos hileras
- Granos pequeños con cubiertas adheridas

b) *Subespecie vulgare*

- Formas cultivadas
- Raquis tenaz (no desarticulable)
- Múltiples variedades botánicas

Las principales variedades botánicas cultivadas incluyen:

1. **var. *distichon* L.** (Cebada de dos hileras)

- Solo la espiguilla central es fértil
- Granos simétricos y uniformes

- Preferida para malta cervecera
2. **var. *hexastichon* L.** (Cebada de seis hileras)
- Las tres espiguillas por nudo son fértiles
 - Seis hileras de granos visibles
 - Mayor rendimiento, pero menor uniformidad
3. **var. *nudum* L.** (Cebada desnuda)
- Granos sin cubiertas adheridas
 - Puede ser de dos o seis hileras
 - Importante en alimentación humana en Asia
4. **var. *trifurcatum* (Schltdl.) Alef.** (Cebada ramificada)
- Espiga ramificada
 - Curiosidad botánica sin importancia comercial

2.2.3 *Clasificación agronómica*

Desde una perspectiva agronómica, las cebadas se clasifican según diversos criterios prácticos:

a) *Por el ciclo de cultivo:*

- Cebadas de invierno (vernalización requerida)
- Cebadas de primavera (sin requerimiento de vernalización)

- Cebadas facultativas (adaptadas a ambos ciclos)

b) *Por el uso final:*

- Cebadas malteras o cerveceras
- Cebadas forrajeras
- Cebadas para consumo humano
- Cebadas de doble propósito

c) *Por el tipo de grano:*

- Cebadas vestidas (cubiertas adheridas)
- Cebadas desnudas (grano libre)
- Cebadas cerosas (alto contenido de amilopectina)

2.3 Evolución y domesticación

El género *Hordeum* evolucionó hace aproximadamente 12-15 millones de años, durante el Mioceno medio, como parte de la radiación adaptativa de la tribu Triticeae. Los análisis filogenéticos moleculares sugieren que el ancestro común de *Hordeum* se originó en Asia occidental, desde donde se dispersó siguiendo dos rutas principales (Ramírez et al., 2024):



Figura 7. Evolución y domesticación de la cebada.

1. **Ruta Euroasiática:** Dio origen a las especies del Viejo Mundo, incluyendo *H. vulgare* y *H. bulbosum*.
2. **Ruta Americana:** A través del puente de Beringia, estableciendo las especies del Nuevo Mundo durante el Plioceno-Pleistoceno.

2.3.1 El Proceso de domesticación

La domesticación de la cebada fue un proceso gradual que involucró múltiples etapas y mecanismos genéticos:

Fase Pre-doméstica (12,000-10,000 AP): Durante esta fase, las comunidades natufienses del Levante comenzaron a recolectar intensivamente cebada silvestre, estableciendo los primeros campos de cultivo incipientes. La selección involuntaria favoreció plantas con:

- Espigas más grandes
- Mayor sincronía en la maduración

- Germinación más uniforme

Fase de Domesticación Inicial (10,000-8,000 AP): Caracterizada por la fijación de los principales rasgos del síndrome de domesticación:

Gen Btr1/Btr2 (Brittle rachis): La mutación en estos genes complementarios resultó en la pérdida de la fragilidad del raquis, impidiendo la dispersión natural de las semillas. Esta característica se fijó rápidamente al ser esencial para la cosecha eficiente.

El gen **Vrs1** (*Six-rowed spike 1*) regula el desarrollo de espiguillas laterales. El alelo dominante, presente en formas silvestres y cebadas dísticas, suprime la fertilidad de flores laterales, limitando la formación de grano a la espiguilla central. Una mutación recesiva elimina esta supresión, permitiendo fertilidad completa y generando arquitecturas hexásticas con seis hileras productivas.

El gen **Nud** (*Naked caryopsis*) determina la adherencia de las glumelas al cariósido. La mutación recesiva produce granos desnudos tras trilla, característica que emergió independientemente en múltiples linajes, evidenciando selección convergente hacia facilitación del procesamiento.

Fase de diversificación (8,000 AP - presente): La expansión geográfica del cultivo catalizó procesos de diversificación multidimensional. La adaptación climática generó ecotipos diferenciados según regímenes térmicos y pluviométricos. La adaptación fenológica involucró alelos específicos en loci de vernalización (*Vrn-H1*, *Vrn-H2*, *Vrn-H3*) que regulan requerimientos de frío y fotoperiodo (*Ppd-H1*, *Ppd-H2*) que controlan sensibilidad a longitud del día, permitiendo cultivo desde latitudes

ecuatoriales hasta circumpolares. La diversificación morfológica abarcó altura de planta, longitud de aristas, pigmentación del grano y composición bioquímica, particularmente contenido proteico, respondiendo a presiones selectivas tanto naturales como antrópicas derivadas de preferencias culturales y usos específicos.

2.3.2 Bases genéticas de la domesticación

Los estudios genómicos han identificado múltiples loci de caracteres cuantitativos (QTL) asociados con rasgos de domesticación:

a) Arquitectura de la espiga:

- *Vrs1*: Fertilidad de espiguillas laterales
- *Vrs2, Vrs3, Vrs4*: Modificadores del desarrollo de espiguillas
- *Int-c*: Densidad de espiguillas en el raquis

b) Desarrollo del grano:

- *Nud*: Adhesión de cubiertas
- Múltiples QTL para tamaño de grano en todos los cromosomas

c) Adaptación temporal:

- *Vrn-H1, Vrn-H2, Vrn-H3*: Respuesta a vernalización
- *Ppd-H1, Ppd-H2*: Sensibilidad al fotoperiodo
- *Eam6*: Tiempo de floración

2.3.3 *Domesticación en el contexto Andino*

La introducción de la cebada en los Andes durante el siglo XVI representa un caso fascinante de "domesticación secundaria" o adaptación post-colombina (Izydorczyk & Edney, 2017). Las variedades españolas introducidas experimentaron:

Adaptación altitudinal: Selección para tolerancia a la hipoxia, radiación UV intensa y amplitud térmica extrema.

Adaptación al fotoperiodo ecuatorial: Desarrollo de variedades insensibles al fotoperiodo, capaces de florecer bajo condiciones de día corto constante.

Integración cultural: La cebada se integró profundamente en los sistemas agrícolas andinos, frecuentemente en rotación con papa y quinua, adoptando prácticas de manejo tradicionales como el barbecho sectorial.

En Ecuador, este proceso ha generado variedades criollas únicas como:

- "Cebada Cañicapa": Desarrollada por el INIAP, combina germoplasma local con líneas mejoradas
- Variedades criollas de Chimborazo adaptadas a altitudes superiores a 3,500 msnm
- Ecotipos locales de Bolívar con ciclos cortos adaptados a las condiciones específicas de la provincia

2.4 Diversidad genética y recursos fitogenéticos

La diversidad genética de la cebada se estructura en varios niveles jerárquicos:



Figura 8. Diversidad genética y recursos fitogenéticos de la cebada.

Diversidad entre especies del género: El género *Hordeum* presenta variación en nivel de ploidía (2x, 4x, 6x), sistema reproductivo (autógamas, alógamas) y adaptación ecológica (Verma, 2018).

Diversidad entre poblaciones silvestres: Las poblaciones de *H. vulgare* subsp. *spontaneum* muestran estructuración geográfica clara, con mayor diversidad en el centro de origen y reducción gradual hacia la periferia.

Diversidad en germoplasma cultivado: Se estima que existen más de 400,000 accesiones de cebada conservadas en bancos de germoplasma mundialmente, representando:

- Variedades locales o landraces (aprox. 60%)

- Líneas de mejoramiento y cultivares obsoletos (30%)
- Cultivares modernos (8%)
- Material silvestre y especies relacionadas (2%)

2.4.1 Conservación de recursos Fitogenéticos

a) Conservación ex situ:

Los principales centros de conservación incluyen:

- **ICARDA** (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas): Más de 32,000 accesiones
- **IPK Gatersleben** (Alemania): 22,000 accesiones
- **USDA-ARS NSGC** (Estados Unidos): 33,000 accesiones
- **VIR** (Rusia): 19,000 accesiones

En Latinoamérica:

- **CIMMYT** (México): Importante colección para América Latina
- **INIA** (Perú): Colección andina
- **INIAP** (Ecuador): Banco de germoplasma con aproximadamente 1,200 accesiones de cebada, incluyendo variedades locales ecuatorianas.

b) *Conservación in situ:*

La conservación en finca de variedades tradicionales es crucial para mantener la evolución continua del cultivo. En Ecuador, comunidades indígenas de Chimborazo, Cotopaxi y Bolívar mantienen sistemas tradicionales que conservan diversidad única (Hinojosa et al., 2021).

2.4.2 Caracterización de la diversidad

Marcadores morfológicos: Tradicionalmente se han usado descriptores como:

- Tipo de espiga (2 vs 6 hileras)
- Presencia/ausencia de aristas
- Color del grano
- Altura de planta
- Días a floración

Marcadores bioquímicos:

- Proteínas de reserva (hordeínas)
- Isoenzimas
- Composición de almidón

Marcadores moleculares: La revolución genómica ha permitido caracterización detallada mediante:

- SSR (Simple Sequence Repeats)
- SNP (Single Nucleotide Polymorphisms)
- DArT (Diversity Array Technology)
- GBS (Genotyping by Sequencing)

2.4.3 Análisis de la diversidad genética global

Estudios recientes usando miles de marcadores SNP han revelado patrones globales de diversidad:

- 1. Cuello de botella de domesticación:** La domesticación redujo la diversidad genética en aproximadamente 40% comparado con poblaciones silvestres.
- 2. Estructura poblacional:** El germoplasma cultivado está estructurado de la siguiente manera:
 - Tipo de espiga (2 vs 6 hileras)
 - Hábito de crecimiento (invierno vs primavera)
 - Origen geográfico
 - Uso final (maltera vs forrajera)
- 3. Flujo génico:** Evidencia de introgresión continua desde poblaciones silvestres en zonas de contacto, particularmente en el Cercano Oriente.

2.4.4 Recursos genéticos para el mejoramiento

La diversidad genética disponible ofrece oportunidades para el mejoramiento:

Resistencia a estrés biótico: Genes de resistencia a royas, oídio, virus del enanismo amarillo (BYDV), identificados en:

- Poblaciones silvestres de *H. vulgare* subsp. *spontaneum*
- Especies relacionadas como *H. bulbosum*
- Variedades locales de centros de diversidad

Tolerancia a estrés abiótico:

- Sequía: Variedades del Norte de África y Medio Oriente
- Frío: Germoplasma de Rusia, Escandinavia y Tibet
- Salinidad: Acciones de regiones costeras y suelos salinos
- Altitud: Variedades andinas y del Himalaya

Calidad nutricional:

- Alto contenido de β -glucanos: variedades cerosas
- Bajo contenido de fitatos: mutantes lpa (low phytic acid)
- Granos pigmentados: antocianinas y compuestos fenólicos

2.5 Variedades tradicionales y mejoradas

Las variedades tradicionales o landraces representan poblaciones dinámicas de cultivos genéticamente diversos, desarrolladas por agricultores a través de selección y adaptación continua (Newton et al., 2011a). Características principales:



Figura 9. Variedades tradicionales y mejoradas de cebada.

Heterogeneidad genética: Alta variabilidad intrapoblacional que confiere estabilidad ante cambios ambientales.

Adaptación local específica: Optimizadas para condiciones agroecológicas particulares, incluyendo:

- Régimen de precipitación local
- Tipo de suelo predominante
- Plagas y enfermedades endémicas

- Prácticas culturales tradicionales

Ejemplos de variedades tradicionales importantes:

En los Andes:

- "K'ara": Cebada de grano desnudo cultivada sobre 3,800 msnm
- "Criolla Chimborazo": Adaptada a heladas y granizadas frecuentes
- "Zapaleña": Ciclo corto para zonas con período libre de heladas limitado

En Etiopía:

- "Balami": Tolerante a sequía terminal
- "Shege": Resistencia múltiple a enfermedades foliares

En el Mediterráneo:

- "Trobi": Base de muchos programas de mejoramiento modernos
- "Ouchak": Tolerancia excepcional a sequía

2.5.1 Desarrollo de variedades mejoradas

El mejoramiento formal de la cebada comenzó a principios del siglo XX, con diferentes objetivos según la región y uso final:

Primera época (1900-1950): Selección masal y selección de líneas puras

- Énfasis en rendimiento y adaptación regional

- Desarrollo de las primeras variedades comerciales
- Ejemplo: 'Manchuria' (EE.UU.), 'Goldthorpe' (Reino Unido)

Era del mejoramiento clásico (1950-1980):

- Hibridación y selección genealógica
- Incorporación de genes de enanismo (sdw1/denso)
- Resistencia a enfermedades específicas
- Ejemplo: 'Triumph' (Alemania), 'Klages' (EE.UU.)

Revolución Verde en cebada (1970-1990):

- Variedades semi-enanas de alto rendimiento
- Arquitectura de planta optimizada
- Amplia adaptación
- Ejemplo: Programa ICARDA/CIMMYT para zonas semiáridas

Era molecular (1990-presente):

- Selección asistida por marcadores (MAS)
- Piramidación de genes
- Selección genómica
- Edición génica (CRISPR/Cas9)

2.5.2 Variedades mejoradas en Ecuador

El programa de mejoramiento del INIAP ha desarrollado variedades adaptadas a las condiciones ecuatorianas:

INIAP-Cañicapa 2003:

- Origen: Cruce INIAP-SHYRI/89/3/GAL/PI6384//ESC-II-72-607
- Características: Ciclo de 180 días, resistente a roya amarilla, rendimiento promedio 2.5 t/ha
- Adaptación: 2,400-3,200 msnm
- Alto contenido de proteína (13-14%)

INIAP-Guaranga 2010:

- Desarrollo participativo con agricultores
- Tolerancia mejorada a heladas
- Ciclo intermedio (165 días)
- Buena calidad maltera

INIAP-Palmira 2014:

- Resistencia a virosis (BYDV)
- Adaptada a zonas más bajas (2,200-2,800 msnm)
- Doble propósito (forraje y grano)

INIAP-Alfa 2021:

- Última liberación del programa nacional
- Incorpora resistencia durable a roya amarilla
- Alto potencial de rendimiento (3.5 t/ha)
- Resistente al acame

2.5.3 Variedades introducidas y su adaptación

Voyager (mencionada en los documentos):

- Origen canadiense, adaptada a condiciones andinas
- Ciclo más corto que variedades locales
- Rendimiento potencial superior (2.5-4.8 t/ha según manejo)
- Requiere mayor inversión en insumos

Metcalfe:

- Variedad canadiense de dos hileras
- Excelente calidad maltera
- Adaptación limitada sobre 3,000 msnm

Scarlett:

- Origen europeo

- Estándar de calidad cervecera
- Sensible a enfermedades foliares en condiciones húmedas

2.5.4 Estrategias de mejoramiento participativo

El mejoramiento participativo ha emergido como estrategia relevante en contextos andinos, articulando conocimiento científico con saberes campesinos:

Selección Participativa de Variedades (SPV): Metodología que evalúa líneas avanzadas directamente en parcelas de agricultores, donde los criterios de selección son definidos por productores según sus prioridades agronómicas, culinarias y comerciales. Este enfoque incrementa significativamente las tasas de adopción varietal al incorporar preferencias locales desde etapas tempranas del proceso selectivo.

Fitomejoramiento Participativo (FP): Modalidad más integradora donde agricultores participan desde las etapas iniciales de hibridación, ejerciendo selección bajo condiciones reales de manejo campesino. Esta estrategia facilita la conservación *in situ* de diversidad genética y genera materiales específicamente adaptados a sistemas de baja intensidad de insumos externos.

Experiencias ecuatorianas: El programa implementado en Chimborazo entre 2010-2015 y la red de productores-mejoradores en Bolívar ejemplifican iniciativas exitosas. Las ferias de diversidad y sistemas comunitarios de intercambio de semillas complementan estos esfuerzos, fortaleciendo la agrobiodiversidad local y la autonomía semillera campesina, contrarrestando procesos de erosión genética asociados a

sustitución varietal acelerada sin considerar contextos socioeconómicos específicos.

2.5.5 *Desafíos y perspectivas*

Desafíos contemporáneos:

Variabilidad climática: La creciente frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos demanda materiales con plasticidad fenotípica amplia y mecanismos de tolerancia a estreses múltiples concurrentes, superando el paradigma de adaptación a ambientes estables.

Presión patogénica evolutiva: La aparición continua de nuevas razas virulentas de patógenos exige estrategias de resistencia durable basadas en piramidización de genes y resistencia cuantitativa de amplio espectro, abandonando enfoques monogénicos susceptibles a ruptura rápida.

Segmentación de mercados: La diversificación de usos finales — cervecería artesanal especializada, alimentos funcionales— impone requisitos específicos de calidad que no se satisfacen con variedades de propósito general, demandando programas de mejoramiento diferenciados.

Imperativo de sostenibilidad: La necesidad de variedades eficientes en captura de nutrientes, uso de agua y supresión de malezas resulta crítica para sistemas de agricultura de bajos insumos externos, predominantes en la agricultura familiar andina.

Erosión genética: El reemplazo acelerado de variedades locales por materiales comerciales uniformes genera pérdida irreversible de alelos

adaptativos únicos, reduciendo la base genética disponible para mejoramiento futuro.

Direcciones emergentes:

El mejoramiento de precisión integra herramientas genómicas —selección asistida por marcadores, edición génica— con fenotipado automatizado de alta resolución, acelerando ganancias genéticas. La biofortificación busca incrementar concentraciones de micronutrientes esenciales, abordando deficiencias nutricionales en poblaciones vulnerables. El desarrollo de variedades multipropósito adaptadas a sistemas diversificados responde a lógicas campesinas donde un único cultivo cumple múltiples funciones. Finalmente, la conservación dinámica articula preservación *ex situ* e *in situ* con utilización activa en programas de mejoramiento, manteniendo procesos evolutivos adaptativos en condiciones reales de cultivo

2.6 Conclusiones del capítulo

Hordeum vulgare constituye un modelo paradigmático para comprender procesos evolutivos bajo selección antrópica. Su domesticación en el Creciente Fértil y subsecuente dispersión transcontinental han generado diversidad genética excepcional que representa el sustrato fundamental para enfrentar desafíos productivos actuales y emergentes en contextos de cambio global.

La comprensión de relaciones taxonómicas y filogenéticas dentro del género *Hordeum* facilita la utilización estratégica de recursos genéticos en programas de mejoramiento. La caracterización molecular contemporánea, integrada con conocimientos tradicionales acumulados por comunidades

agrícolas, ofrece posibilidades inéditas para desarrollar materiales específicamente adaptados a condiciones edafoclimáticas y socioeconómicas particulares.

En el contexto andino ecuatoriano, la complementariedad entre variedades tradicionales mantenidas *in situ* por agricultores y materiales mejorados desarrollados por programas formales constituye una estrategia robusta para asegurar seguridad alimentaria y resiliencia productiva ante variabilidad climática creciente. El éxito futuro dependerá de la integración efectiva de cinco componentes: conservación sistemática de recursos genéticos mediante bancos de germoplasma y sistemas comunitarios; mejoramiento participativo que articule conocimiento científico con criterios campesinos; aplicación de tecnologías moleculares avanzadas genómica, fenotipado automatizado; rescate y valorización de saberes tradicionales sobre manejo y usos del cultivo; y políticas públicas que reconozcan la multifuncionalidad del cereal en territorios rurales.

La diversidad genética de *Hordeum* tanto formas silvestres como cultivadas representa patrimonio biológico invaluable cuya conservación, caracterización y utilización sostenible resultan imperativos éticos hacia generaciones futuras, garantizando opciones adaptativas en escenarios productivos inciertos derivados de transformaciones ambientales y demandas sociales cambiantes.

CAPÍTULO III

3 MORFOLOGÍA Y ANATOMÍA

El conocimiento de la morfología y anatomía de la cebada constituye la base para interpretar su comportamiento agronómico y optimizar su manejo en campo. En este capítulo se describen detalladamente las estructuras vegetativas y reproductivas del cultivo, desde el sistema radicular y los macollos hasta la espiga y el grano. Se analizan componentes como la disposición de las hojas, la arquitectura del tallo, la formación de espiguillas y la estructura interna del grano, relacionando cada característica con su función fisiológica y su importancia productiva.

El capítulo no se limita a una descripción descriptiva, sino que establece vínculos entre la forma de la planta y la eficiencia en la captación de luz, agua y nutrientes, así como su respuesta frente a factores ambientales adversos. Este apartado sienta las bases para comprender las etapas de desarrollo, los procesos fisiológicos y las decisiones de manejo agronómico que serán abordados en los siguientes capítulos.

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) presenta una arquitectura morfológica característica de las gramíneas, con adaptaciones específicas que le confieren versatilidad agronómica y capacidad de adaptación a diversos ambientes. El conocimiento detallado de su morfología y anatomía es fundamental para optimizar las prácticas de manejo del cultivo, comprender las bases del mejoramiento genético y maximizar el potencial productivo. Este capítulo examina sistemáticamente las estructuras vegetativas y reproductivas de la cebada, desde el sistema radicular hasta

el grano maduro, proporcionando las bases morfoanatómicas necesarias para la comprensión integral del cultivo.

3.1 Sistema radicular

El sistema radicular de la cebada es de tipo fasciculado o fibroso, característico de las monocotiledóneas. Esta configuración le proporciona una eficiente exploración del volumen de suelo disponible, aunque con menor profundidad de penetración comparado con otros cereales como el trigo o el centeno (Newton et al., 2011b).



Figura 10. Sistema radicular de la cebada.

3.1.1 Desarrollo y distribución

El desarrollo radicular presenta dos fases distintivas:

Raíces seminales o primarias: Se originan directamente del embrión durante la germinación. Generalmente se desarrollan entre 3 y 8 raíces seminales, dependiendo del vigor de la semilla y las condiciones ambientales. Estas raíces son temporales y su función principal es sostener la plántula durante las primeras etapas de desarrollo.

Raíces adventicias o secundarias: Emergen de los nudos basales del tallo, formando el sistema radicular definitivo. Se desarrollan a partir de que la planta tiene tres hojas y constituyen el sistema principal de absorción de agua y nutrientes durante todo el ciclo de la planta.

3.1.2 Distribución espacial y profundidad

La distribución del sistema radicular presenta las siguientes características (Falconí et al., 2015b):

Arquitectura vertical: Aproximadamente el 60% de la biomasa radical se concentra en los primeros 25 centímetros del perfil edáfico, configurando una densidad radicular elevada en horizontes superficiales. Esta distribución refleja adaptación a ambientes donde los recursos hídricos y nutricionales se concentran en capas superiores del suelo.

Capacidad de exploración profunda: Bajo condiciones edáficas favorables ausencia de impedimentos físicos o químicos, las raíces pueden alcanzar profundidades de 1.20 metros, aunque esta penetración resulta significativamente inferior a la de otros cereales invernales como trigo o centeno, que frecuentemente superan los 2 metros. Esta limitación relativa influye en la vulnerabilidad del cultivo a sequías que afectan estratos profundos del perfil.

Expansión horizontal: El sistema radical desarrolla extensión lateral entre 20-30 centímetros desde la corona de la planta, generando una red densa de exploración horizontal que optimiza la captura de recursos en la zona de mayor actividad biológica del suelo y facilita la competencia interespecífica con malezas de ciclo similar.

3.1.3 *Implicaciones agronómicas*

Esta distribución radicular tiene importantes consecuencias para el manejo del cultivo:

- Mayor susceptibilidad al estrés hídrico superficial
- Eficiencia en la absorción de nutrientes poco móviles como el fósforo
- Respuesta rápida a la fertilización superficial
- Menor competencia con malezas de raíz pivotante profunda

3.2 Tallo y macollos

3.2.1 *Estructura del tallo principal*

El tallo de la cebada, denominado técnicamente culmo o caña, presenta una estructura típica de gramínea:



Figura 11. Tallo y macollos de la cebada.

Composición: Formado por 6 a 8 entrenudos separados por nudos macizos. Los entrenudos son huecos (fistulosos) y presentan un diámetro mayor en su parte central que en los extremos.

Altura: Variable según el genotipo y las condiciones ambientales, este valor se encuentra entre los 50 cm en variedades enanas hasta más de 100 cm en variedades comunes.

a) *Características anatómicas:*

- Epidermis con cutícula cerosa que reduce la pérdida de agua
- Tejido de sostén (esclerenquima) que proporciona rigidez

- Haces vasculares dispersos característicos de monocotiledóneas
- Médula parenquimática que puede lignificarse con la madurez

3.2.2 *Macollamiento*

El macollamiento o ahijamiento es un proceso fundamental que determina el potencial de rendimiento del cultivo:

Origen y desarrollo: Los macollos son tallos secundarios que se originan de yemas axilares ubicadas en los nudos basales del tallo principal. El proceso comienza típicamente cuando la planta tiene 3-4 hojas verdaderas (15-25 días después de la siembra) (Bossio & Cassman, 1991b).

a) *Factores determinantes:*

- **Genéticos:** Las variedades difieren en su capacidad de macollamiento
- **Ambientales:** Temperatura (óptima 10-15°C), fotoperíodo, disponibilidad de luz
- **Nutricionales:** Especialmente nitrógeno y fósforo
- **Densidad de siembra:** Mayor densidad reduce el macollamiento por planta

b) *Dinámica del macollamiento:*

- Macollamiento activo: 20-40 días después de la emergencia
- Número máximo de macollos: 2-9 por planta según condiciones

- Mortalidad de macollos: 30-50% no llegan a producir espiga
- Macollos fértiles finales: 1-4 espigas por planta

3.2.3 *Importancia agronómica del macollamiento*

El macollamiento es un componente crítico del rendimiento porque:

- Determina el número de espigas por unidad de superficie
- Permite compensación ante fallas de emergencia
- Influye en la competencia con malezas
- Afecta la uniformidad de maduración

3.3 Hojas: estructura y función

Las hojas de la cebada presentan una estructura típica de gramínea con adaptaciones específicas:

Componentes de la hoja:

- **Vaina:** Porción basal tubular que envuelve el tallo, de color verde y superficie lisa o ligeramente pubescente. Proporciona sostén mecánico y protección al entrenudo en crecimiento.
- **Lígula:** esta tiene una estructura membranosa translúcida y se ubica en la unión de la vaina y la lámina. En el cultivo de cebada es corta (1-2 mm) y dentada.

- **Aurículas:** son prolongaciones laterales en la base de la lámina que abrazan el tallo. En el cultivo de la cebada son largas y se entrecruzan, distinguiéndola del trigo.
- **Lámina o limbo:** Porción libre de la hoja, lineal-lanceolada, de 10-25 cm de longitud y 0.5-1.5 cm de ancho. Presenta nervaduras paralelas y puede ser glabra o pubescente.

3.3.1 Anatomía foliar

Estructura microscópica:

- Epidermis con estomas en ambas superficies (anfiestomática)
- Células buliformes que participan en el enrollamiento foliar
- Mesófilo con cloroplastos para la fotosíntesis C3
- Haces vasculares con vaina parenquimática

3.3.2 Filotaxia y desarrollo

- Disposición alterna dística (1/2)
- Emergencia de 8-10 hojas en el tallo principal
- La hoja bandera (última hoja) es crucial para el llenado del grano, contribuyendo hasta el 40% de los fotoasimilados

3.3.3 Funciones fisiológicas

Las hojas cumplen funciones esenciales:

- **Fotosíntesis:** Principal órgano productor de carbohidratos
- **Transpiración:** Regulación del balance hídrico
- **Intercambio gaseoso:** Absorción de CO₂ y liberación de O₂
- **Almacenamiento temporal:** Reserva de nutrientes removilizables

3.4 Inflorescencia y flores

3.4.1 *La espiga*

La inflorescencia de la cebada es una espiga compuesta, característica distintiva del género *Hordeum*:



Figura 12. Inflorescencia y flores de la cebada.

Estructura del raquis:

- Eje central con entrenudos cortos y aplanados
- Alternancia de nudos en forma de zigzag
- 20-30 nudos en promedio
- Longitud total de 8-15 cm según variedad

3.4.2 Organización de las espiguillas

Disposición: Tres espiguillas unifloras en cada nudo del raquis, formando tríadas características (Jiang et al., 2025c).

Tipos de cebada según fertilidad:

- **Cebada de seis hileras** (*H. vulgare* var. *hexastichum*): Las tres espiguillas son fértiles
- **Cebada de dos hileras** (*H. vulgare* var. *distichum*): Solo la espiguilla central es fértil

3.4.3 Estructura floral

Cada espiguilla contiene los siguientes elementos:

Glumas: Dos brácteas basales reducidas, lineales o lanceoladas.

Lemma y pálea: Envolturas florales que protegen los órganos reproductivos y posteriormente forman las cubiertas del grano.

Órganos reproductivos:

- **Androceo:** Tres estambres con anteras basifijas
- **Gineceo:** Ovario súpero unilocular con dos estigmas plumosos
- **Lodículas:** Dos estructuras que facilitan la apertura floral

3.4.4 *Biología floral*

- **Tipo de polinización:** Predominantemente autógama (>95% autofecundación)
- **Cleistogamia:** Las flores generalmente no se abren, la fecundación ocurre antes de la antesis
- **Período de floración:** 4-8 días para completar la espiga

3.5 Grano: estructura y composición

3.5.1 *Morfología externa*

El grano de cebada es botánicamente un carióspside vestido:

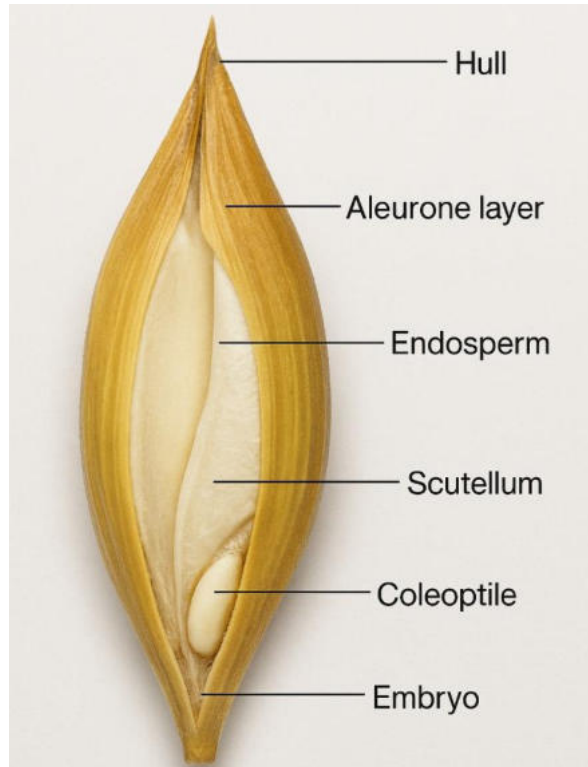


Figura 13. Grano: estructura y composición de la cebada.

Dimensiones:

- Longitud: 6.0-9.5 mm
- Ancho: 2.5-4.0 mm
- Espesor: 1.5-3.0 mm
- Peso de mil granos: 30-60 g

Coberturas:

- Permanecen adheridas las glumelas (lemma y pálea)

- Representan 10-13% del peso del grano
- Protección contra patógenos y daño mecánico

3.5.2 Anatomía del grano

Pericarpio: Pared del fruto, delgada y fusionada con la testa.

Testa o cubierta seminal: Proporciona protección y regula la permeabilidad.

Capa de aleurona:

- 2-4 capas de células vivas ricas en proteínas (15-20%)
- Contiene enzimas hidrolíticas esenciales para la germinación
- Rica en vitaminas del complejo B y minerales

Endospermo:

- Constituye 75-80% del peso del grano
- Células muertas repletas de gránulos de almidón (60-65%)
- Matriz proteica (8-15%) principalmente hordeínas
- Diferenciación en endospermo vítreo y harinoso

Embrión o germen:

- Representa 2.5-3.5% del peso del grano
- Contiene el eje embrionario (radícula, plúmula)

- Rico en lípidos (15-20%) y proteínas (25-30%)
- Escutelo que facilita la movilización de reservas

3.5.3 Composición química

Carbohidratos (75-80%):

- Almidón: 60-65%
- Fibra: 10-15% (principalmente en cubiertas)
- Azúcares simples: 2-3%

Proteínas (8-15%):

- Hordeínas (prolaminas): 35-45%
- Glutelinas: 35-45%
- Albúminas y globulinas: 10-20%

Lípidos (2-3%): Concentrados principalmente en el germen.

Minerales (2-3%): Fósforo, potasio, magnesio, calcio, hierro.

Vitaminas: Complejo B, tocoferoles (vitamina E).

3.6 Características distintivas entre variedades

3.6.1 Criterios morfológicos de diferenciación

Tipo de espiga:

- Densidad: laxa, intermedia, compacta
- Forma: cilíndrica, piramidal, fusiforme
- Orientación: erecta, semierecta, péndula

Características del grano:

- Presencia/ausencia de aristas (barbas)
- Color de las glumelas: blanco, amarillo, negro, azul
- Adherencia de las cubiertas: vestido vs. desnudo

Porte de la planta:

- Altura: enanas (<60 cm), semienanas (60-90 cm), altas (>90 cm)
- Hábito de crecimiento: erecto, semipostrado, postrado

3.6.2 Variedades tradicionales vs. modernas

Variedades tradicionales:

- Mayor altura (riesgo de acame)
- Ciclo más largo

- Menor índice de cosecha
- Mayor rusticidad

Variedades modernas:

- Genes de enanismo (Rht)
- Mayor índice de cosecha (0.45-0.50)
- Resistencia a enfermedades específicas
- Calidad dirigida al uso final

3.6.3 *Implicaciones para el manejo*

El conocimiento de las características morfológicas varietales es esencial para:

- Selección de cultivares según ambiente
- Determinación de densidad de siembra
- Programación de aplicaciones fitosanitarias
- Momento óptimo de cosecha
- Estrategias de mejoramiento genético

3.7 Conclusiones del capítulo

La arquitectura morfoanatómica de *H. vulgare* evidencia adaptaciones evolutivas que sustentan su versatilidad agronómica y eficiencia

productiva. El sistema radical, caracterizado por distribución superficial pero alta densidad, optimiza la captura de recursos en ambientes con déficit hídrico moderado, condición frecuente en zonas semiáridas donde el cultivo presenta ventajas comparativas. La capacidad de macollamiento confiere plasticidad fenotípica que permite ajustar el número de tallos fértiles según disponibilidad de recursos, mecanismo compensatorio fundamental para estabilizar rendimientos ante variabilidad ambiental.

La estructura foliar, con aurículas conspicuas y entrecruzadas que facilitan identificación taxonómica, optimiza simultáneamente la intercepción de radiación fotosintéticamente activa y la eficiencia de conversión lumínica en biomasa. La organización inflorescente en espigas compactas con espiguillas dispuestas en tríadas representa una estrategia reproductiva eficiente que maximiza el número de granos por unidad de superficie. La predominancia de autogamia —superior al 98%— asegura estabilidad genética generacional, característica que facilita la fijación de caracteres deseables en programas de mejoramiento y la multiplicación de variedades comerciales.

El grano, con su compleja organización anatómica y composición bioquímica diferenciada entre fracciones tisulares, constituye simultáneamente el objetivo productivo y un modelo de eficiencia en acumulación de reservas nutritivas concentradas en volumen reducido. La diversidad morfológica entre tipos varietales —desde cebadas hexásticas tradicionales hasta cultivares semienanos dísticos modernos— refleja siglos de selección dirigida hacia optimización productiva según ambientes específicos y destinos comerciales diferenciados.

Esta plasticidad morfológica, integrada con conocimiento detallado de cada estructura anatómica, proporciona fundamentos indispensables para maximizar potencial productivo mediante prácticas de manejo precisas y estrategias de mejoramiento genético efectivas. El dominio de estos conceptos morfoanatómicos resulta esencial para profesionales agrónomos, constituyendo la base conceptual necesaria para comprender procesos fisiológicos, interpretar respuestas a estreses ambientales, diseñar estrategias de manejo agrónomo y establecer criterios de selección en programas de mejoramiento que se desarrollan en capítulos subsecuentes del texto.

CAPÍTULO IV

4 FISIOLOGÍA Y DESARROLLO

El rendimiento de la cebada no depende únicamente de factores externos como el clima o el manejo agronómico, sino también de cómo la planta regula sus procesos fisiológicos a lo largo del ciclo de crecimiento. Este capítulo aborda de manera integral las bases fisiológicas que determinan la germinación, el macollamiento, la formación del tallo, la emisión de la espiga, la floración y el llenado del grano. Se analizan los mecanismos de absorción y transporte de agua, fotosíntesis, respiración, translocación de fotoasimilados y regulación hormonal, destacando los períodos críticos donde el estrés puede comprometer significativamente el rendimiento.

Comprender estas dinámicas permite no solo interpretar el comportamiento del cultivo frente a condiciones adversas, sino también tomar decisiones agronómicas más precisas en cuanto a fertilización, riego, densidad de siembra y control de enfermedades. Este capítulo proporciona, por tanto, los fundamentos fisiológicos necesarios para vincular la ciencia del crecimiento vegetal con la práctica agrícola moderna.

El dominio exhaustivo de los procesos fisiológicos y la secuencia fenológica del cultivo constituye fundamento indispensable para optimizar estrategias agronómicas y expresar plenamente el potencial productivo del genotipo. Cada fase del desarrollo presenta demandas específicas de recursos y define períodos críticos cuya correcta gestión determina el rendimiento final alcanzable. Este capítulo analiza integralmente los mecanismos fisiológicos y las etapas de desarrollo desde la imbibición

seminal hasta la madurez fisiológica, proporcionando bases científicas para decisiones técnicas fundamentadas en el manejo del cultivo.

4.1 Germinación y emergencia

La germinación inicia el ciclo ontogénico de *H. vulgare* y representa una fase crítica que condiciona el establecimiento poblacional del cultivo. Este proceso fisiológico complejo involucra la reactivación del metabolismo seminal latente y la transición desde un sistema heterotrófico — dependiente de reservas acumuladas en el endospermo— hacia una plántula autótrofa capaz de realizar fotosíntesis neta positiva. El éxito en esta transición determina la uniformidad de emergencia, densidad poblacional efectiva y competitividad inicial frente a malezas, factores que influyen sustancialmente en el rendimiento potencial del sistema productivo.



Figura 14. Germinación y emergencia de la cebada.

El grano de cebada inicia su germinación una vez absorbido entre el 45-60% de su peso en agua, iniciándose la germinación cuando se ha absorbido un 25%. La temperatura óptima para esta fase es de 20-22°C, siendo su duración normal 12 a 15 días. Sin embargo, este proceso puede experimentar retrasos significativos bajo condiciones desfavorables (Geng et al., 2022).

4.1.1 Factores que afectan la germinación

Disponibilidad hídrica edáfica: El agua constituye el factor desencadenante primario del proceso germinativo. La semilla requiere alcanzar un contenido mínimo de humedad del 25% respecto a su peso seco para activar sistemas enzimáticos y reanudar el metabolismo celular. La velocidad de imbibición depende de la composición de las cubiertas seminales, el potencial hídrico del suelo y la temperatura ambiental.

Régimen térmico: La temperatura óptima para emergencia se sitúa alrededor de 20°C, con un rango favorable entre 20-22°C que permite completar el proceso en 5-7 días bajo condiciones controladas. Temperaturas inferiores a 15°C prolongan significativamente el período germinativo, incrementando la exposición a patógenos de suelo y predación por fauna edáfica. Temperaturas superiores a 30°C pueden inducir dormancia secundaria o inhibir enzimas hidrolíticas esenciales, comprometiendo la viabilidad de la semilla.

Profundidad de colocación: La profundidad óptima oscila entre 2.0 y 5.0 centímetros, balance que asegura contacto semilla-suelo adecuado para imbibición mientras mantiene reservas energéticas suficientes para que el coleoptilo alcance la superficie. Siembras excesivamente profundas —

superiores a 7 cm— resultan en plántulas etioladas con escasas reservas remanentes al momento de emergencia, reduciendo vigor inicial y competitividad. Siembras superficiales —inferiores a 2 cm— exponen las semillas a desecación rápida y predación por aves.

Aireación edáfica: El oxígeno atmosférico resulta indispensable para la respiración aeróbica que genera la energía metabólica necesaria durante germinación. Suelos compactados con porosidad reducida o condiciones de saturación hídrica prolongada limitan la difusión de oxígeno hacia la zona seminal, induciendo metabolismo anaeróbico que genera etanol y otros metabolitos tóxicos, comprometiendo la viabilidad embrionaria y reduciendo porcentajes de emergencia.

4.1.2 Fisiología de la Emergencia

Durante la emergencia, el coleóptilo protege el meristemo apical y las primeras hojas verdaderas mientras atraviesan el suelo. Con la aparición del coleóptilo, la planta deja de crecer dando paso a las primeras hojas verdaderas que se muestran a los 3 y 5 días.

4.2 Fase vegetativa: Plántula y macollamiento

Del tallo brotan 8 a 9 hojas que son un indicador para la aplicación de reguladores de crecimiento. Durante esta fase inicial, la plántula desarrolla su sistema radicular primario y comienza a establecer las bases para su crecimiento posterior (Guo et al., 2024).



Figura 15. Fase vegetativa: Plántula y macollamiento en cebada.

4.2.1 Macollamiento

El macollamiento constituye una de las fases más importantes del desarrollo vegetativo, ya que determina en gran medida el potencial de rendimiento del cultivo a través del número de espigas por unidad de superficie.

Inicio y duración: Los macollos empiezan a emerger a los 15 a 25 días después de la siembra. Una vez que las condiciones del medio ambiente son favorables o si se disminuye la densidad de plantas, es viable una compensación por medio de la producción de más tallos. Los macollos surgen a lo largo de un tiempo de 2 semanas.

Factores determinantes: Por lo general una planta desarrolla entre 2-9 macollos dependiendo la densidad de siembra, disponibilidad de agua y

nutrientes. La variedad genética también juega un papel crucial en la capacidad de macollamiento.

Importancia agronómica: El macollamiento tiene especial relevancia, ya que el número de estas determinará en un porcentaje significativo el número de espigas verdaderas que sobrevivan por metro cuadrado y este se traduce en un componente de rendimiento (Kaur & Kaur, 2022).

4.2.2 *Desarrollo del sistema radicular*

El sistema radicular es fasciculado, fibroso y alcanza poca profundidad en comparación con el de otros cereales. Se estima que un 60% del peso de las raíces se encuentra en los primeros 25 cm del suelo y que las raíces apenas alcanzan 1.20 m. de profundidad. Esta característica tiene importantes implicaciones para el manejo del riego y la fertilización.

4.3 Fase reproductiva: Encañado y espigamiento

El encañado inicia con la aparición del primer nudo, determinándose antecedente de su presencia sobre el área del suelo. En aquel instante es viable visualizar la futura espiga, la cual está justo sobre comentado nudo, presentando un tamaño de alrededor de 5 mm.



Figura 16. Fase reproductiva: encañado y espigamiento en cebada.

A los tres o cuatro días de nacimiento de la planta los entrenudos superiores del tallo comienzan a alargarse, desplazando la espiga embrionaria sobre la superficie del suelo. Durante esta fase ocurre un rápido crecimiento de los tallos.

De allí en adelante se crea un veloz incremento de los tallos, los cuales, a lo largo de la fase de encañado, van estructurándose basado en la formación de nuevos nudos y entrenudos. Al finalizar la fase de encañado, la espiga se hace prominente en la vaina de la hoja bandera, fase exitosa como "embuche o embuchamiento" (Crisan et al., 2023).

4.3.1 *Espigamiento*

El espigamiento se realiza a continuación de la emergencia de las aristas donde logran visualizarse notoriamente de uno a dos días después. El espigamiento termina al quedar afuera del cuello de la espiga.

Esta etapa es crítica para la determinación del número final de espigas, uno de los principales componentes del rendimiento. El número de espigas es una proporción de las macollas producidas algunas no sobrevivan para formar espigas. El número final de espigas se establece al momento que el cultivo florece.

4.4 Floración y polinización

4.4.1 *Proceso de floración*

Se observa la aparición de los estambres a los días después de haber finalizado la fase de espigamiento, las aberturas de las flores proceden en la segunda semana de haber emergido la espiga.

La cebada presenta una característica particular en su proceso de polinización: Las flores tienen tres estambres y un pistilo de dos estigmas. Es autógama. Las flores abren después de haberse realizado la fecundación, lo que tiene importancia para la conservación de los caracteres de una variedad determinada.



Figura 17. Floración y polinización en cebada.

4.4.2 Duración y condiciones óptimas

La flor se abre por algunos minutos, pero la polinización dura en un tiempo más corta. La floración se completa en dos días. Esta rapidez en el proceso de floración es una adaptación evolutiva que asegura la autofecundación y reduce la dependencia de condiciones ambientales específicas.

La temperatura óptima para la floración se sitúa entre 16-17°C, con humedades relativas moderadas que faciliten la dehiscencia de las anteras sin comprometer la viabilidad del polen.

4.5 Formación y llenado del grano

4.5.1 *Desarrollo inicial del grano*

Esta se produce después de la polinización, el crecimiento de las semillas ocurre dentro de la flor y sucede muy rápido y termina al séptimo día de igual manera la cantidad de materia seca de las semillas comienza a aumentar.

4.5.2 *Fases del llenado de grano*

El proceso de llenado del grano se caracteriza por componerse de tres fases:

Fase acuosa (0-10 días post-antesis): Caracterizada por rápida división celular y alta acumulación de agua. El endospermo se encuentra en estado líquido.

Fase lechosa (10-20 días post-antesis): Durante el envejecimiento de la cebada a partir del noveno día la cáscara se pega al grano y se torna de un color amarillento. Después de dos semanas comienza la fase de grano pastoso.

Fase de maduración (20-30 días post-antesis): El llenado de grano en la cebada se completa en 30 días después de la floración. Durante esta fase el grano se seca.



Figura 18. Formación y llenado del grano en cebada.

4.5.3 Factores limitantes

Durante la etapa de llenado de grano hay una clara limitación por fuente nitrogenada siendo la principal fuente para los granos el nitrógeno acumulado previo a la floración y que es removilizado hacia los granos durante el periodo de post-floración.

El estrés hídrico durante esta fase puede reducir significativamente el peso del grano, mientras que temperaturas elevadas aceleran la maduración pero disminuyen el período de llenado, resultando en granos más livianos.

4.6 Madurez fisiológica y comercial

4.6.1 *Madurez fisiológica*

Esta fase se produce cuando el grano ha alcanzado su madurez fisiológica, teniendo una humedad del 40%. Ocurre cuando el 50% de las plantas presentan el pedúnculo de color amarillo.

En este punto, el grano ha alcanzado su máximo peso seco y cesa la acumulación de materia seca. La conexión vascular entre el grano y la planta madre se interrumpe, marcando el fin del período de llenado (Mičúchová et al., 2024).



Figura 19. Madurez fisiológica y comercial en cebada.

4.6.2 *Madurez comercial*

La maduración se cumple cuando el grano ha disminuido su humedad llegando al 14% en grano duro. Este nivel de humedad es crítico para el almacenamiento seguro y la comercialización del grano.

La cosecha se ejecuta en la época seca, si el cultivo cosechado se va emparvar es aconsejable iniciar a cortar en el momento que el grano haya ocurrido su madurez fisiológica, con el fin de evitar el desgrane, pero para la realizar la trilla el grano debe tener un 15% en porcentaje de humedad.

4.7 Fenología y escalas de desarrollo

4.7.1 *Importancia de las escalas fenológicas*

Al conocer la fenología se puede:

- Optimizar el momento de aplicación de insumos
- Identificar períodos críticos para el rendimiento
- Planificar las labores culturales en el cultivo
- Evaluar el desarrollo del cultivo en relación con las condiciones ambientales y sus actividades correspondientes.

4.7.2 *Duración del ciclo*

En caso de cebada forrajera, el desarrollo alcanza hasta la fase de grano lechoso, es decir cuando la espiga presenta de 20 a 30% de grano lechosos; el periodo vegetativo normal oscila entre 160 y 190 días.

La duración total del ciclo varía considerablemente según:

- La variedad (precoces, intermedias o tardías)
- Las condiciones ambientales (temperatura y fotoperiodo)
- El manejo agronómico
- El destino de la producción (forraje o grano)

4.7.3 *Períodos críticos para el rendimiento*

Los momentos más sensibles del cultivo, donde el estrés puede causar mayores pérdidas de rendimiento son:

1. **Emergencia-macollamiento:** Determina la densidad de plantas y el número potencial de macollos
2. **Inicio de encañado:** Define el número de macollos fértiles
3. **Floración:** Establece el número de granos por espiga
4. **Llenado de grano:** Determina el peso final del grano

Las etapas de desarrollo sensibles al déficit hídrico se presentan en la germinación produciendo una baja densidad, luego al inicio de la floración causando una reducción en el número de espigas y número de hijuelos, más tarde en la polinización en esta parte se ve afectado el número de granos por espiga y finalmente al momento del llenado de grano.

4.8 Conclusiones del capítulo

El desarrollo ontogénico de *H. vulgare* comprende una secuencia programada de eventos fisiológicos, cada uno caracterizado por demandas específicas de recursos y definiendo períodos críticos que condicionan el rendimiento alcanzable. La comprensión integral de esta progresión fenológica posibilita:

Optimización de intervenciones agronómicas: La identificación precisa de cada estadio fenológico mediante escalas estandarizadas Zadoks, Feekes facilita la sincronización de prácticas como fertilización fraccionada, aplicaciones fitosanitarias y riegos complementarios con los momentos de máxima respuesta fisiológica, incrementando eficiencia técnica y económica de las intervenciones.

Maximización del potencial productivo: El reconocimiento de períodos críticos particularmente las fases de diferenciación de espiguillas, meiosis y llenado de grano permite concentrar recursos y atenciones en ventanas temporales donde el impacto sobre componentes del rendimiento resulta determinante, evitando dispendios en etapas de menor sensibilidad.

Selección varietal contextualizada: La elección de materiales genéticos con ciclos fenológicos apropiados a cada ambiente productivo considerando régimen pluviométrico, distribución térmica estacional y riesgos de heladas optimiza la captura de recursos disponibles y minimiza la exposición a estreses en fases vulnerables, estrategia fundamental en sistemas de secano o ambientes con restricciones climáticas recurrentes.

Planificación preventiva: El seguimiento fenológico sistemático mediante observaciones periódicas permite anticipar requerimientos del cultivo y programar intervenciones agronómicas de manera proactiva, reduciendo riesgos asociados a aplicaciones tardías o desincronizadas que comprometen eficacia técnica y rentabilidad económica.

El éxito productivo depende fundamentalmente de la sincronización entre la progresión fenológica del cultivo y la disponibilidad de condiciones ambientales favorables, así como de la implementación oportuna de prácticas de manejo calibradas según las demandas específicas de cada fase de desarrollo.

CAPÍTULO V

5 REQUERIMIENTOS EDAFOCLIMÁTICOS

La productividad de la cebada depende estrechamente de la interacción entre suelo, clima y manejo agronómico. Este capítulo examina las condiciones edáficas y ambientales óptimas para el cultivo, incluyendo temperatura, fotoperíodo, altitud, disponibilidad hídrica y características físico-químicas del suelo. Se abordan los factores limitantes más frecuentes en regiones andinas, como suelos ácidos, baja disponibilidad de fósforo, déficit hídrico estacional y heladas tardías.

Asimismo, se analizan las adaptaciones fisiológicas que permiten a la cebada desarrollarse en zonas de altura y climas templados, así como los riesgos asociados a escenarios de cambio climático. Este capítulo proporciona las bases técnicas para seleccionar sitios de siembra, elegir variedades adaptadas y diseñar prácticas de manejo específicas según las condiciones agroecológicas.

Hordeum vulgare L. exhibe una plasticidad adaptativa excepcional entre cereales cultivados, prospera en gradientes ambientales contrastantes desde ecosistemas tropicales de altura hasta regiones templadas y subárticas. Esta versatilidad ecológica, resultado de milenios de selección bajo condiciones diversas, ha permitido su establecimiento en territorios donde otros cereales presentan limitaciones severas. No obstante, la expresión óptima del potencial productivo y la obtención de atributos de calidad específicos para usos comerciales diferenciados requieren comprender con precisión los requerimientos edafoclimáticos que condicionan el desempeño agronómico.

Los factores ambientales —clima y suelo— constituyen determinantes primarios en la planificación agrícola y la selección varietal contextualizada para cada territorio. La interacción compleja entre régimen climático, características edáficas y constitución genética define no solamente el rendimiento alcanzable, sino también los atributos cualitativos del grano —contenido proteico, peso hectolítrico, poder diastásico— y la sostenibilidad del sistema productivo en términos de eficiencia en el uso de recursos y resiliencia ante perturbaciones. Este capítulo analiza sistemáticamente los requerimientos ambientales específicos del cultivo, proporcionando fundamentos científicos para decisiones técnicas en producción comercial orientada tanto a mercados industriales —maltería— como a alimentación animal o consumo humano directo.



Figura 20. Zonas agroecológicas aptas para la cebada.

5.1 Zonas agroecológicas aptas

5.1.1 *Clasificación global de zonas cerealeras*

La cebada se cultiva principalmente en cinco grandes regiones agroecológicas a nivel mundial:

Zona templada fría: Comprende las regiones del norte de Europa, Canadá, norte de Estados Unidos y Rusia. Caracterizada por veranos frescos e inviernos rigurosos, con precipitaciones entre 300-500 mm anuales. En estas zonas se produce principalmente cebada de dos hileras para maltería.

Zona mediterránea: Comprende la cuenca mediterránea, sur de Australia y Chile central. Se caracteriza por inviernos templados y veranos secos, con precipitaciones anuales entre 400-700 mm concentradas en período otoño-invernal. Predominan variedades hexásticas destinadas tanto a maltería como alimentación animal, adaptadas a ciclos invierno-primaverales que evitan estrés térmico durante llenado de grano.

Zona semiárida: Abarca las grandes planicies norteamericanas, estepa euroasiática y región pampeana sudamericana. Presenta precipitaciones irregulares (250-450 mm) y amplitudes térmicas diarias pronunciadas. La cebada forrajera domina estos sistemas, seleccionada por rusticidad y eficiencia en uso de agua, frecuentemente cultivada en rotación con leguminosas forrajeras o bajo sistemas de conservación de humedad.

Zona subtropical de altura: Incluye altiplanos andinos, mesetas mexicanas, meseta tibetana y tierras altas de África oriental. Con altitudes superiores a 2,000 metros, temperaturas moderadas por efecto altitudinal

y precipitaciones variables (300-800 mm), alberga ecotipos adaptados a fotoperíodos intermedios y amplitudes térmicas diarias marcadas, con tolerancia a heladas durante fases vegetativas tempranas.

Zona tropical de altura: Comprende regiones ecuatoriales montañosas por encima de 2,400 metros, incluyendo Ecuador, Colombia, Perú, Bolivia y macizos montañosos de África oriental. En estos territorios, caracterizados por fotoperíodos relativamente constantes y regímenes bimodales de precipitación, la cebada se cultiva principalmente para consumo humano directo mediante procesamiento tradicional machica, máchica o como componente de sistemas agrícolas de subsistencia donde cumple funciones de seguridad alimentaria y rotación con tubérculos andinos.

5.1.2 Zonificación agroecológica en América Latina

En América Latina, la producción se concentra en tres regiones agroecológicas diferenciadas:

Altiplano andino: Se extiende desde Venezuela hasta el noroeste argentino, en elevaciones entre 2,400-4,000 metros. Esta franja altitudinal presenta regímenes térmicos relativamente estables a lo largo del año con oscilaciones térmicas diarias pronunciadas pero estacionalidad anual moderada, precipitaciones con marcada estacionalidad frecuentemente distribuidas en períodos bimodales, y predominio de suelos andosoles derivados de cenizas volcánicas con alta capacidad de retención hídrica pero frecuentemente ácidos. Ecuador, Perú y Bolivia constituyen los principales productores, donde el cultivo se integra en sistemas agrícolas

tradicionales con funciones de seguridad alimentaria y rotación con cultivos andinos como papa, quinua y habas.

Zona templada del Cono Sur: Argentina y Chile reproducen condiciones análogas a regiones mediterráneas europeas, con inviernos húmedos y veranos secos. Predominan sistemas tecnificados con variedades tanto dísticas como hexásticas, destinadas mayoritariamente a maltería de exportación. La zona pampeana argentina y los valles centrales chilenos concentran la producción comercial, caracterizada por rendimientos superiores a 4 toneladas por hectárea y estricto cumplimiento de estándares internacionales de calidad maltera.

Altiplanos mexicanos: Las mesetas del centro de México, entre 1,800-2,500 metros de altitud, constituyen la principal región productora del país. El cultivo se orienta fundamentalmente hacia la industria maltera nacional, que abastece un mercado cervecero interno robusto. Esta zona se caracteriza por precipitaciones estivales asociadas al monzón norteamericano y temperaturas moderadas por efecto altitudinal, condiciones que favorecen la producción de cebada con especificaciones técnicas apropiadas para maltería.

5.1.3 Zonificación específica en Ecuador

En Ecuador, el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) ha delimitado cinco zonas agroecológicas con aptitud diferenciada para el cultivo:

Zona norte: Abarca provincias de Carchi e Imbabura, entre 2,600-3,200 metros de altitud. Presenta precipitaciones abundantes (800-1,200 mm

anuales) distribuidas con relativa uniformidad, temperaturas medias entre 10-14°C, y predominio de andosoles de origen volcánico con elevada capacidad de retención hídrica pero susceptibles a compactación bajo laboreo inadecuado.

Zona centro-norte: Comprende Pichincha y sectores septentrionales de Cotopaxi, en elevaciones de 2,400-3,100 metros. Se caracteriza por precipitaciones bimodales (600-900 mm totales) con máximos en marzo-mayo y octubre-diciembre, temperaturas medias entre 12-16°C, y suelos franco-arenosos con drenaje adecuado que favorecen laboreo oportuno pero demandan manejo cuidadoso de fertilidad.

Zona centro: Integra Cotopaxi, Tungurahua y Chimborazo, entre 2,500-3,300 metros. Constituye la principal región productora nacional, con precipitaciones relativamente escasas (400-800 mm) concentradas en período octubre-mayo, temperaturas medias entre 8-15°C, y predominio de sistemas de producción campesinos donde la cebada se asocia con cultivos andinos tradicionales.

Zona centro-sur: Abarca Bolívar y Cañar, en altitudes de 2,400-3,200 metros. Presenta precipitaciones entre 600-1,000 mm concentradas en período octubre-mayo, temperaturas medias de 10-16°C, y sistemas productivos caracterizados por fragmentación predial y agricultura familiar con limitada adopción tecnológica.

Zona sur: Incluye Azuay y Loja, entre 2,200-2,800 metros de altitud. Se distingue por precipitaciones más irregulares e impredecibles (300-700 mm), temperaturas ligeramente superiores (12-18°C), y sistemas

productivos donde la cebada representa cultivo marginal complementario a maíz, fréjol y producción pecuaria de pequeña escala.

5.2 Requerimientos climáticos

5.2.1 Temperatura

La temperatura constituye el factor climático más determinante en el crecimiento y desarrollo de la cebada. La respuesta térmica del cultivo varía según la fase fenológica y el genotipo (Murillo et al., 2023).

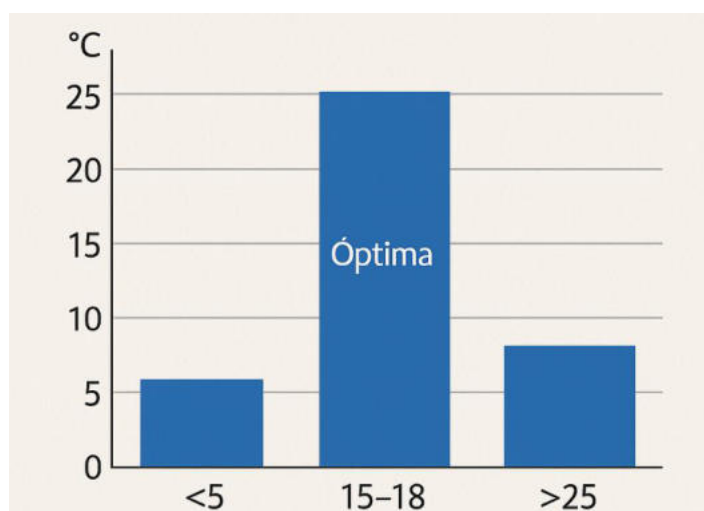


Figura 21. Temperatura óptima para la cebada.

a) Rangos térmicos óptimos

Requerimientos térmicos por fase fenológica:

Germinación: El proceso se inicia a temperaturas mínimas de 3-4°C, con óptimo entre 20-22°C que permite completar la imbibición y emergencia radicular en 48-72 horas. Temperaturas superiores a 30°C inhiben la

actividad enzimática necesaria para movilización de reservas, mientras que valores cercanos a 0°C simplemente ralentizan el proceso sin provocar daños irreversibles en semillas viables.

Emergencia y establecimiento: La fase demanda temperaturas entre 15-20°C para elongación eficiente del coleoptilo y desarrollo inicial del sistema radical adventicio. Temperaturas inferiores a 5°C prolongan excesivamente el período de emergencia hasta 15-20 días, incrementando la exposición a patógenos edáficos como *Fusarium* spp. y *Pythium* spp., y reduciendo la uniformidad poblacional.

Crecimiento vegetativo: El desarrollo óptimo de área foliar y arquitectura radical ocurre con temperaturas diurnas de 15-25°C y nocturnas de 8-15°C. Esta amplitud térmica día-noche favorece el macollamiento mediante acumulación diurna de fotosintatos y su translocación nocturna hacia meristemas axilares, estimulando la emisión de tallos secundarios que incrementan el potencial productivo.

Diferenciación floral: Proceso crítico que requiere temperaturas de 12-18°C durante la transición de fase vegetativa a reproductiva. Temperaturas superiores a 25°C aceleran excesivamente el proceso, reduciendo el número de espiguillas diferenciadas por espiga componente fundamental del rendimiento y pueden inducir esterilidad parcial de flores, comprometiendo el número potencial de granos.

Floración y fecundación: Constituye la fase de mayor sensibilidad térmica. El rango óptimo de 16-20°C asegura viabilidad polínica, receptividad estigmática y crecimiento apropiado del tubo polínico. Temperaturas superiores a 30°C desnaturalizan proteínas del polen y

reducen su longevidad, mientras que valores inferiores a 8°C inhiben la dehiscencia de anteras y ralentizan el crecimiento del tubo polínico, resultando en fallas de fecundación que incrementan el porcentaje de granos vanos.

Llenado de grano: Demanda temperaturas moderadas de 18-24°C que optimicen la duración del período de llenado sin acelerar excesivamente la senescencia foliar. Temperaturas superiores a 28°C acortan drásticamente esta fase, reduciendo el peso individual del grano y afectando negativamente atributos de calidad como contenido proteico por concentración y peso hectolítrico.

b) Tolerancia a extremos térmicos:

La especie exhibe notable tolerancia a frío durante fases vegetativas. Plantas en macollamiento activo soportan temperaturas de hasta -10°C mediante acumulación de azúcares solubles que reducen el punto de congelación del contenido celular, siempre que la exposición sea breve y las plantas estén adecuadamente endurecidas. Esta característica permite cultivo en regiones con heladas frecuentes durante invierno.

La tolerancia al calor resulta más limitada. Temperaturas sostenidas superiores a 35°C inducen estrés térmico severo manifestado en reducción del área foliar por enrollamiento, aceleración del ciclo fenológico particularmente acortamiento de la fase de llenado, y disminución significativa del rendimiento tanto por reducción de peso de grano como por incremento en el porcentaje de granos arrugados o malformados que comprometen calidad comercial.

c) *Tiempo térmico y predicción fenológica:*

La cebada requiere acumular entre 1,200-1,800 grados día (base 0°C) para completar su ciclo ontogénico, variación determinada por el grupo varietal: materiales precoces demandan 1,200-1,400 GD, intermedios 1,400-1,600 GD, y tardíos 1,600-1,800 GD. El cálculo de unidades térmicas acumuladas permite predecir con precisión la ocurrencia de fases fenológicas críticas, facilitando la sincronización de prácticas agronómicas fertilización fraccionada, aplicaciones fitosanitarias preventivas con momentos de máxima respuesta fisiológica, optimizando eficiencia técnica y económica del manejo.

5.2.2 Precipitación y balance hídrico

Los requerimientos hídricos de la cebada varían según la región, variedad y objetivo productivo. El manejo eficiente del agua es crucial para la sostenibilidad del cultivo.



Figura 22. Precipitación y balance hídrico en cebada.

a) *Requerimientos hídricos totales*

La demanda hídrica total de la cebada oscila entre 350-550 mm durante todo el ciclo de cultivo, distribuidos de la siguiente manera:

- Germinación-emergencia: 15-25 mm
- Macollamiento: 80-120 mm
- Encañado: 100-150 mm
- Floración-llenado: 120-180 mm
- Maduración: 35-65 mm

b) *Períodos críticos*

Macollamiento temprano: El estrés hídrico durante esta fase reduce significativamente el número de macollos productivos, afectando directamente el rendimiento final.

Diferenciación floral: La deficiencia de agua durante la iniciación de la panoja puede reducir el número de flores por espiguilla y, consecuentemente, el número de granos por espiga.

Floración: Período más sensible al déficit hídrico. La falta de agua durante la antesis causa aborto floral y reduce drásticamente la fertilidad.

Llenado temprano de grano: El estrés hídrico en esta fase afecta el tamaño final del grano y el peso hectolítrico.

c) *Coeficientes de cultivo (Kc)*

Los coeficientes de cultivo para cebada, utilizados en el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c), son:

- Fase inicial (0-20 días): $K_c = 0.4-0.5$
- Desarrollo (20-60 días): $K_c = 0.6-1.0$
- Media estación (60-90 días): $K_c = 1.0-1.2$
- Maduración (90-120 días): $K_c = 0.6-0.3$

d) Eficiencia de uso del agua

La cebada presenta alta eficiencia en el uso del agua comparada con otros cereales. En condiciones óptimas, se pueden obtener 2-3 kg de grano por cada mm de agua evapotranspirada. Esta eficiencia se debe a:

- Sistema radicular relativamente profundo (hasta 120 cm)
- Capacidad de ajustar la transpiración según la disponibilidad hídrica
- Ciclo más corto que otros cereales
- Mecanismos fisiológicos de tolerancia al estrés hídrico

5.2.3 Radiación solar y fotoperiodo

a) Requerimientos de radiación

La cebada requiere aproximadamente 450-500 cal/cm²/día durante la fase de crecimiento activo. La radiación solar afecta directamente:

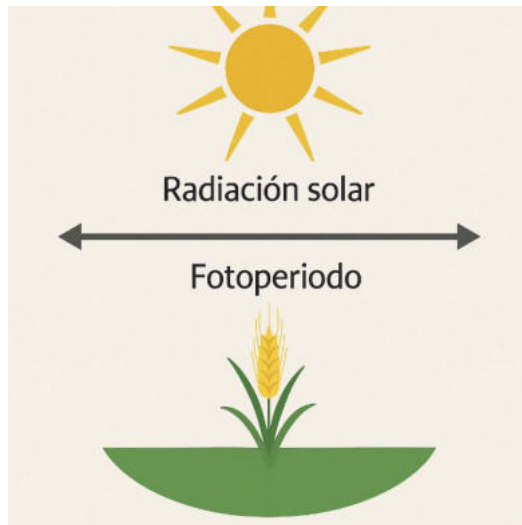


Figura 23. Radiación solar y fotoperiodo en cebada.

Fotosíntesis: Intensidades luminosas de 40-60 klux son óptimas para maximizar la tasa fotosintética. Niveles inferiores reducen la acumulación de biomasa.

Morfogénesis: La calidad de la luz (relación rojo:rojo lejano) influye en el alargamiento de entrenudos y la arquitectura de la planta.

Llenado de grano: La radiación durante esta fase determina el peso final del grano. Períodos nublados prolongados reducen significativamente el rendimiento.

b) Respuesta al fotoperiodo

La cebada se clasifica como planta de día largo facultativo. La mayoría de las variedades modernas son foto-insensibles, permitiendo su cultivo en diversas latitudes.

Variedades sensibles: Requieren días largos (>14 horas de luz) para iniciar la floración. Adaptadas a latitudes altas (>45°N o S).

Variedades insensibles: Florecen independientemente de la longitud del día. Aptas para regiones tropicales y subtropicales de altura.

Variedades de respuesta intermedia: Muestran respuesta parcial al fotoperiodo, acelerando la floración con días largos pero capaces de florecer con días cortos.

5.2.4 *Altitud*

La altitud afecta múltiples factores que influyen en el crecimiento de la cebada (Serna Illicachi, 2025):

a) Efectos directos de la altitud

Presión atmosférica: La reducción de la presión con la altitud afecta la concentración de CO₂ disponible para la fotosíntesis. Sin embargo, la menor competencia por CO₂ puede compensar parcialmente este efecto.

Radiación UV: El incremento de la radiación ultravioleta con la altitud puede causar estrés oxidativo, especialmente en variedades no adaptadas.

Amplitud térmica: Las grandes variaciones de temperatura día-noche en altitudes elevadas pueden ser beneficiosas para la calidad del grano pero limitantes para el crecimiento vegetativo.

b) Rangos altitudinales óptimos

0-1000 msnm: Zonas templadas tradicionales con variedades de invierno y primavera. Predomina la cebada maltera de alta calidad.

1000-2000 msnm: Zonas de transición con condiciones moderadas. Aptas para cebada forrajera y maltera con variedades adaptadas.

2000-3000 msnm: Zona óptima para cebada en regiones subtropicales. Ecuador, Perú, Bolivia y México producen principalmente en este rango.

3000-4000 msnm: Límite superior para variedades adaptadas. Únicamente cebada de consumo directo con ciclos prolongados y variedades criollas resistentes al frío.

c) Adaptaciones fisiológicas a la altura

Las variedades de cebada cultivadas en altura han desarrollado adaptaciones específicas:

- Mayor densidad de tricomas para reducir la radiación UV
- Tallos más cortos para resistir vientos fuertes
- Ciclo vegetativo más largo para compensar las bajas temperaturas
- Mayor concentración de antocianinas como protección antioxidante

5.3 Requerimientos edáficos

5.3.1 *Textura y estructura*



Figura 24. Textura y estructura del suelo para cebada.

a) *Texturas óptimas*

La cebada presenta amplia adaptación a diferentes texturas de suelo, aunque existe una jerarquía de preferencias:

Suelos franco-arenosos: Considerados óptimos por su balance entre drenaje y retención de humedad. Facilitan la emergencia, el desarrollo radicular y las labores de cultivo.

Suelos francos: Excelentes para la producción, especialmente cuando presentan buen drenaje. Proporcionan adecuada retención de nutrientes y agua.

Suelos franco-arcillosos: Apropriados si tienen buen drenaje. La mayor retención de humedad puede ser ventajosa en zonas semiáridas.

Suelos arenosos: Limitantes por la baja retención de agua y nutrientes, requieren manejo intensivo de fertilización y riego.

Suelos arcillosos: Generalmente inadecuados debido a problemas de drenaje, compactación y dificultades para las labores.

b) Estructura del suelo

Porosidad: Se requiere un 50-60% de porosidad total, con equilibrio entre macroporos ($>50 \mu\text{m}$) para drenaje y microporos ($<50 \mu\text{m}$) para retención de agua.

Densidad aparente: Valores óptimos entre 1.2-1.4 g/cm^3 . Densidades superiores limitan la penetración radicular y el intercambio gaseoso.

Estabilidad de agregados: Importante para prevenir la compactación y mantener la infiltración de agua. Se requiere $>60\%$ de agregados estables al agua.

c) Profundidad efectiva

La cebada requiere mínimo 60 cm de profundidad efectiva, aunque 80-100 cm son ideales. El 60% del sistema radicular se concentra en los primeros 25 cm, pero las raíces pueden alcanzar 120 cm en condiciones favorables (Tercero Guaman, 2024).

5.3.2 *pH y fertilidad*



Figura 25. pH y fertilidad del suelo en cebada.

a) Rangos de pH

pH óptimo: 6.5-7.5, donde la disponibilidad de la mayoría de nutrientes es máxima.

Rango tolerable: 6.0-8.0, con posibilidad de producción comercial mediante ajustes en la fertilización.

pH limitante: <5.5 o >8.5, donde se requieren enmiendas para viabilizar el cultivo.

b) Efectos del pH en la disponibilidad de nutrientes

pH ácido (<6.0):

- Reducción en la disponibilidad de P, Ca, Mg y Mo
- Incremento de la disponibilidad de Fe, Mn, Zn (posible toxicidad)

- Activación del Al intercambiable (tóxico para las raíces)
- Reducción de la actividad biológica del suelo

pH alcalino (>8.0):

- Reducción drástica de la disponibilidad de Fe, Mn, Zn, B
- Formación de precipitados de P con Ca
- Posibles problemas de salinidad asociada

c) Requerimientos nutricionales

Macronutrientes primarios:

- Nitrógeno (N): 80-120 kg/ha según objetivo productivo
- Fósforo (P_2O_5): 60-90 kg/ha, crítico en suelos deficientes
- Potasio (K_2O): 40-80 kg/ha, importante para resistencia al acame

Macronutrientes secundarios:

- Calcio (Ca): 20-40 kg/ha, esencial para estructura celular
- Magnesio (Mg): 15-25 kg/ha, componente de clorofila
- Azufre (S): 15-30 kg/ha, importante para síntesis proteica

Micronutrientes críticos:

- Boro (B): 0.5-1.0 kg/ha, esencial para desarrollo reproductivo

- Zinc (Zn): 2-4 kg/ha, común su deficiencia en suelos alcalinos
- Manganeso (Mn): 1-2 kg/ha, activador enzimático

5.3.3 Drenaje y salinidad



Figura 26. Drenaje y salinidad.

a) Requerimientos de drenaje

Requerimientos de drenaje: *H. vulgare* exhibe sensibilidad marcada a condiciones de saturación hídrica prolongada. Los requerimientos específicos incluyen:

Drenaje superficial e interno: El agua gravitacional debe evacuar completamente en 24-48 horas posteriores a eventos pluviométricos intensos o riegos. Encharcamientos superiores a 48 horas inducen anoxia radical que compromete respiración aeróbica, generando metabolitos tóxicos y favoreciendo proliferación de patógenos edáficos como *Pythium ultimum* y *Phytophthora* spp.

Posición de la capa freática: Debe mantenerse por debajo de 60 centímetros de profundidad durante todo el ciclo. Capas freáticas superficiales restringen el desarrollo radical efectivo, concentrándolo en horizontes superiores y reduciendo la capacidad de exploración del perfil, lo cual incrementa vulnerabilidad a déficits hídricos temporales.

Conductividad hidráulica: Se requieren valores mínimos de 1-2 cm/hora en los primeros 30 centímetros del perfil edáfico. Valores inferiores, característicos de suelos con horizontes compactados o con alta proporción de arcillas expansivas, generan condiciones de saturación temporal que afectan negativamente la emergencia y el establecimiento poblacional.

b) Tolerancia a estrés salino

La cebada presenta tolerancia moderada a la salinidad dentro del espectro de cereales cultivados:

Umbral de salinidad: 8 dS/m de conductividad eléctrica en extracto de saturación del suelo representa el límite superior para crecimiento sin restricciones. Por debajo de este valor, no se observan efectos significativos sobre rendimiento o calidad.

Salinidad limitante severa: Entre 12-15 dS/m la producción se reduce drásticamente, manifestándose decrementos superiores al 50% del potencial productivo. Valores superiores a 15 dS/m resultan prácticamente inhibitorios para el cultivo.

Posicionamiento comparativo: La tolerancia es superior a la de trigo común (*Triticum aestivum*), maíz (*Zea mays*) y arroz (*Oryza sativa*), pero

inferior a la de sorgo (*Sorghum bicolor*) y cebada forrajera, donde la selección ha priorizado rusticidad sobre atributos de calidad específicos.

c) *Mecanismos y manifestaciones del estrés salino*

Estrés osmótico: La elevada concentración de sales solubles en la solución edáfica reduce el potencial hídrico externo, dificultando la absorción radical de agua incluso en condiciones de humedad edáfica aparentemente adecuada, fenómeno denominado "sequía fisiológica".

Toxicidad iónica específica: La acumulación preferencial de iones sodio (Na^+) y cloruro (Cl^-) en tejidos foliares interfiere con procesos metabólicos esenciales, particularmente fotosíntesis y síntesis proteica, generando disfunciones celulares progresivas.

Antagonismos nutricionales: El exceso de sodio compite con la absorción de cationes esenciales como potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), induciendo deficiencias nutricionales secundarias que agravan los efectos directos de la salinidad.

Sintomatología diagnóstica: Se manifiesta inicialmente como necrosis marginal y apical de hojas más expuestas por acumulación preferencial de sales vía transpiración, seguida de reducción generalizada del crecimiento, clorosis prematura y senescencia acelerada que acortan el ciclo productivo, reduciendo el período de llenado de grano y comprometiendo tanto rendimiento como calidad comercial.

5.4 Adaptación al cambio climático

5.4.1 Escenarios climáticos futuros

a) *Proyecciones climáticas y sus implicaciones productivas:*

Los modelos climáticos globales anticipan transformaciones sustanciales que modificarán las condiciones de producción cerealera:

Incremento térmico progresivo:

Magnitud proyectada: Elevaciones entre 1.5-4.0°C para el período 2050-2100, variación dependiente de trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero y efectividad de políticas de mitigación.

Consecuencias agronómicas esperadas:

- **Acortamiento del ciclo fenológico:** La acumulación acelerada de unidades térmicas reducirá la duración de fases críticas, particularmente el período de llenado de grano, disminuyendo el peso final del grano y afectando atributos de calidad industrial.
- **Incremento del estrés térmico reproductivo:** Mayor frecuencia de temperaturas superiores a 30°C durante floración-fecundación incrementará la esterilidad de flores y el porcentaje de granos vanos, componentes que reducen directamente el rendimiento.
- **Desplazamiento altitudinal y latitudinal:** Las zonas óptimas de producción migrarán hacia mayores altitudes en regiones tropicales y hacia latitudes superiores en zonas templadas, obligando a redefinir las áreas productivas tradicionales.

- **Demanda evapotranspirativa incrementada:** Temperaturas elevadas intensificarán las pérdidas hídricas por evapotranspiración, acentuando el déficit hídrico en sistemas de secano.

b) *Alteraciones en regímenes pluviométricos:*

Heterogeneidad espacial: Las proyecciones indican incrementos pluviométricos en algunas regiones (latitudes altas) y reducciones en otras (zonas semiáridas subtropicales), generando ganadores y perdedores geográficos en términos de aptitud productiva.

Patrones de transformación anticipados:

- **Intensificación de eventos extremos:** Mayor frecuencia tanto de sequías prolongadas como de precipitaciones torrenciales concentradas, incrementando la variabilidad interanual y la incertidumbre productiva.
- **Redistribución estacional:** Modificaciones en la temporalidad de períodos lluviosos pueden desincronizar la disponibilidad hídrica con fases críticas del cultivo, particularmente floración y llenado de grano.
- **Incremento en intensidad unitaria:** Lluvias más concentradas en eventos individuales incrementarán riesgos de erosión, encharcamiento y lavado de nutrientes, afectando negativamente la sostenibilidad edáfica.

c) *Elevación de CO₂ atmosférico:*

Efectos potencialmente benéficos:

- **Estímulo fotosintético:** Concentraciones elevadas de CO₂ superiores a 550 ppm proyectadas para 2050 pueden incrementar tasas de asimilación neta de carbono entre 10-30% en condiciones controladas, efecto conocido como fertilización carbónica.
- **Mejora en eficiencia hídrica:** El incremento en la relación fotosíntesis/transpiración por cierre parcial estomático puede reducir el consumo hídrico por unidad de biomasa producida, ventaja particularmente relevante en ambientes con restricciones hídricas.

Limitaciones y efectos adversos:

- **Dilución proteica:** El incremento en acumulación de carbohidratos sin correspondiente aumento en asimilación nitrogenada reduce el contenido proteico del grano, comprometiendo calidad para usos que demandan altos niveles proteicos como alimentación animal o ciertos nichos de panificación.
- **Saturación progresiva del efecto:** A concentraciones superiores a 700 ppm, el beneficio fotosintético marginal se reduce sustancialmente, y otros factores limitantes nitrógeno, agua, temperatura predominan en la determinación del rendimiento.

5.4.2 Estrategias de adaptación

a) Estrategias de adaptación al cambio climático:

Mejoramiento genético dirigido:

Termotolerancia reproductiva: Desarrollo de materiales que mantengan viabilidad polínica y receptividad estigmática bajo temperaturas superiores a 30°C durante anthesis, incorporando genes de proteínas de choque térmico (*heat shock proteins*) y mecanismos de osmoprotección que estabilicen membranas celulares bajo estrés térmico.

Eficiencia en uso de agua: Selección de genotipos con arquitectura radical profunda, conductancia estomática optimizada y capacidad de ajuste osmótico que permitan mantener productividad bajo déficit hídrico moderado. Rasgos como *stay-green* senescencia retardada resultan particularmente valiosos al extender el período de llenado bajo condiciones terminales de sequía.

Tolerancia a estreses abióticos múltiples: Desarrollo de variedades con resistencia a sequía terminal, tolerancia a salinidad moderada y capacidad de prosperar en suelos ácidos mediante eficiencia en absorción de fósforo y tolerancia a aluminio intercambiable, condiciones frecuentemente asociadas en suelos tropicales degradados.

Plasticidad fenotípica ampliada: Selección de genotipos capaces de ajustar arquitectura de planta, duración de fases fenológicas y partición de asimilados según condiciones ambientales prevalentes, característica que confiere estabilidad de rendimiento a través de ambientes contrastantes.

Ajustes en manejo agronómico:

Reconfiguración de calendarios agrícolas: Adelantamiento de fechas de siembra para que fases reproductivas críticas floración y llenado inicial ocurran bajo condiciones térmicas menos severas, estrategia particularmente relevante en regiones donde se proyectan incrementos térmicos primaverales.

Riego de precisión: Implementación de sistemas de irrigación por goteo subsuperficial o aspersión de baja intensidad controlados por sensores de humedad edáfica y demanda evapotranspirativa calculada, maximizando productividad por unidad de agua aplicada y reduciendo pérdidas por evaporación directa.

Prácticas de agricultura conservacionista: Adopción de labranza reducida o cero que preserve estructura edáfica e incremente infiltración, mantenimiento de coberturas vegetales que reduzcan evaporación directa y temperaturas superficiales del suelo, y rotaciones estratégicas con leguminosas que mejoren fertilidad nitrogenada y rompan ciclos de plagas.

Manejo integrado de sistemas: Combinación sinérgica de prácticas genotipos resilientes, fechas de siembra ajustadas, conservación de humedad edáfica, nutrición balanceada que incrementen la capacidad del sistema productivo para absorber perturbaciones climáticas sin colapsos de rendimiento.

Diversificación productiva estratégica:

Mezclas varietales: Siembra simultánea de variedades con diferentes características fenológicas y tolerancias a estrés que distribuyan riesgos

temporalmente y espacialmente, asegurando que al menos una fracción del cultivo encuentre condiciones apropiadas en años climáticamente atípicos.

Cultivos de cobertura intercalares: Integración de especies no comerciales leguminosas, gramíneas forrajeras que mejoren propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, incrementando resiliencia del sistema ante sequías y mejorando eficiencia en ciclado de nutrientes.

Sistemas agroforestales: Establecimiento de arreglos espaciales que integren árboles dispersos o en hileras con cultivos anuales, generando microclimas moderados con menores amplitudes térmicas diarias, reducción de velocidad del viento y redistribución hídrica mediante captación de neblina o reducción de evaporación, particularmente relevante en sistemas andinos de altura.

5.4.3 Herramientas de monitoreo y predicción

a) Sistemas de alerta temprana climática:

Modelación meteorológica local: Implementación de modelos de predicción climática de mesoescala que anticipen condiciones adversas heladas tardías, olas de calor, sequías con 7-15 días de antelación, ventana temporal suficiente para implementar medidas preventivas como riegos de salvación, aplicaciones antiestress o adelantamiento de cosecha.

Índices de estrés fisiológico: Monitoreo continuo mediante sensores multiparamétricos de indicadores como temperatura de canopia diferencial con temperatura ambiente que evidencia estrés hídrico, potencial hídrico foliar, y contenido relativo de agua, permitiendo intervenciones correctivas

antes que el estrés genere daños irreversibles en componentes del rendimiento.

Plataformas digitales integradas: Desarrollo de aplicaciones móviles que consoliden información meteorológica georeferenciada, modelos fenológicos predictivos y recomendaciones de manejo contextualizadas, democratizando el acceso a información técnica especializada para productores de distintas escalas operativas.

b) Agricultura de precisión aplicada:

Teledetección multispectral: Utilización de imágenes satelitales Sentinel-2, Landsat y vehículos aéreos no tripulados equipados con cámaras multispectrales que capturen índices de vegetación (NDVI, GNDVI) y detecten variabilidad intrapredial en vigor del cultivo, identificando zonas que requieren atención diferenciada en fertilización o protección fitosanitaria.

Internet de las cosas agrícola: Implementación de redes de sensores inalámbricos distribuidos en el campo que midan continuamente humedad edáfica a múltiples profundidades, temperatura ambiente, radiación solar y velocidad del viento, transmitiendo datos en tiempo real a plataformas de gestión que faciliten decisiones de riego y aplicaciones agroquímicas basadas en condiciones reales del sitio.

Inteligencia artificial y aprendizaje automático: Desarrollo de algoritmos que integren datos históricos de clima, suelo, manejo y rendimiento para generar recomendaciones optimizadas de fechas de siembra, dosis de fertilización variable espacialmente, y predicción de

rendimiento con suficiente anticipación para negociaciones comerciales ventajosas, maximizando retornos económicos bajo restricciones ambientales y operativas específicas de cada sistema productivo.

5.5 Conclusiones del capítulo

Los requerimientos edafoclimáticos de la cebada son diversos y complejos, reflejando la notable adaptabilidad de esta especie a diferentes ambientes. Sin embargo, para optimizar la productividad y calidad del grano, es esencial comprender las interacciones entre genotipo, ambiente y manejo.

La temperatura se posiciona como el factor climático más determinante, especialmente durante las fases reproductivas. La gestión hídrica requiere especial atención a los períodos críticos, mientras que los requerimientos edáficos enfatizan la importancia del drenaje y el pH adecuado.

El cambio climático plantea desafíos significativos pero también oportunidades. La implementación de estrategias de adaptación basadas en mejoramiento genético, ajustes en el manejo y uso de tecnologías emergentes será crucial para mantener la productividad y sostenibilidad del cultivo de cebada en el futuro.

La comprensión integral de estos requerimientos constituye la base para el desarrollo de sistemas productivos resilientes y económicamente viables, contribuyendo a la seguridad alimentaria global y al desarrollo sostenible de las comunidades rurales.

CAPÍTULO VI

6 ESTABLECIMIENTO DEL CULTIVO

El éxito productivo de la cebada comienza con una adecuada preparación del suelo y un establecimiento eficiente del cultivo. Este capítulo aborda el acondicionamiento físico del terreno, el manejo de residuos de cultivos anteriores, los métodos de labranza conservacionista y la implementación de siembra directa en sistemas sostenibles. Se analizan los criterios para definir densidad de siembra, profundidad, disposición de surcos y uso de equipos mecanizados o manuales según la escala productiva.

También se discuten aspectos críticos como la calidad de la semilla, su vigor germinativo, el uso de tratamientos pregerminativos y la importancia de lograr una emergencia uniforme para garantizar el número óptimo de plantas por metro cuadrado. Este capítulo conecta directamente la fisiología inicial de la planta con decisiones agronómicas prácticas, sentando las bases para el manejo posterior del cultivo.

El establecimiento del cultivo representa la fase fundacional cuyo manejo determina la trayectoria productiva subsecuente y condiciona el rendimiento alcanzable. Las decisiones técnicas implementadas durante este período crítico preparación edáfica, selección de germoplasma, época y densidad de siembra, profundidad de colocación influyen decisivamente sobre el desarrollo vegetativo posterior, la capacidad de macollamiento efectivo, la competitividad inicial frente a malezas, la resistencia a perturbaciones bióticas y abióticas, y finalmente la expresión del potencial genético del material cultivado.

Un establecimiento deficiente caracterizado por emergencia irregular, poblaciones subóptimas, plántulas débiles raramente se compensa durante fases posteriores del ciclo, resultando en pérdidas de rendimiento que ninguna intensificación en el manejo puede revertir completamente. Por el contrario, un establecimiento exitoso genera las condiciones para que el cultivo exprese su potencial productivo bajo restricciones ambientales propias de cada sistema, maximizando el retorno sobre inversiones en insumos y prácticas de manejo aplicadas durante las fases vegetativas y reproductivas.

Este capítulo examina sistemáticamente los componentes técnicos necesarios para lograr implantación óptima del cultivo, integrando principios agronómicos fundamentales con consideraciones prácticas específicas según las particularidades edafoclimáticas, socioeconómicas y tecnológicas que caracterizan las distintas regiones productoras, desde sistemas intensivos tecnificados hasta agricultura familiar campesina donde la disponibilidad de recursos y el acceso a insumos especializados presentan limitaciones sustanciales que demandan adaptaciones estratégicas

6.1 Selección del terreno

La selección del lote constituye la decisión estratégica inicial cuyas implicaciones condicionan todas las fases posteriores del ciclo productivo. Este proceso debe sustentarse en evaluación multidimensional que integre características edáficas, configuración topográfica, condiciones microclimáticas y antecedentes históricos del terreno, evitando decisiones basadas exclusivamente en disponibilidad operativa o conveniencia

logística que frecuentemente derivan en establecimientos subóptimos con consecuencias económicas adversas.

6.1.1 Características edáficas ideales

H. vulgare manifiesta preferencia por suelos de textura franca o franco-arenosa que combinen adecuada capacidad de retención hídrica con drenaje eficiente, evitando tanto déficits severos en suelos arenosos excesivamente porosos como encharcamientos en arcillas pesadas mal estructuradas. Los suelos óptimos presentan reacción ligeramente ácida a neutra con pH entre 6.5-7.5, aunque la especie tolera alcalinidad moderada hasta pH 8.5, manifestando mayor amplitud de adaptación a reacciones alcalinas que trigo o maíz, característica que amplía las opciones productivas en regiones con suelos carbonatados.

La conductividad eléctrica debe mantenerse por debajo de 8 dS/m para evitar reducciones significativas en rendimiento. Valores superiores inducen estrés osmótico y toxicidad iónica que comprometen establecimiento poblacional y desarrollo vegetativo, afectando particularmente el macollamiento efectivo y reduciendo el número de espigas fértiles por unidad de superficie.

El contenido de materia orgánica óptimo entre 2-4% proporciona capacidad de intercambio catiónico suficiente, mejora la estructura edáfica facilitando laboreo y penetración radical, e incrementa la capacidad de retención hídrica útil, atributo crítico en sistemas de secano. Valores inferiores caracterizan suelos degradados que requieren enmiendas orgánicas previas para optimizar condiciones físicas, químicas y biológicas.

La profundidad efectiva superior a 60 centímetros definida como el espesor de suelo sin limitaciones físicas o químicas severas para penetración radical permite desarrollo radicular tridimensional adecuado. Aunque el 60% de la biomasa radical se concentra en los primeros 25 centímetros, la capacidad de explorar estratos más profundos resulta determinante durante períodos de déficit hídrico, donde el acceso a humedad residual en horizontes inferiores puede resultar crítico para completar el llenado de grano sin estrés terminal severo.

6.1.2 Consideraciones topográficas

Los terrenos con pendientes inferiores al 5% resultan ideales para mecanización integral preparación de suelo, siembra, aplicaciones agroquímicas, cosecha minimizando riesgos de volcamiento de maquinaria, facilitando uniformidad en profundidad de siembra y optimizando eficiencia operativa. Pendientes entre 5-15% requieren prácticas de conservación como trazado en curvas de nivel, establecimiento de terrazas de banco o camellones que reduzcan velocidad de escorrentía superficial y riesgos erosivos, incrementando los costos de establecimiento y complicando las operaciones mecanizadas.

Pendientes superiores al 15% presentan limitaciones severas para agricultura mecanizada convencional y acentúan dramáticamente los riesgos de erosión hídrica, particularmente en suelos con cobertura vegetal reducida durante fases iniciales del cultivo. En estos terrenos, el cultivo solo resulta viable mediante prácticas intensivas de conservación terrazas individuales, barreras vivas, labranza mínima con mantenimiento de

rastrojos o sistemas de tracción animal que reducen la escala operativa y la viabilidad económica.

La exposición del terreno modifica el balance radiativo y térmico del sitio. En el hemisferio sur, laderas con exposición norte reciben mayor radiación solar incidente, elevando temperaturas del suelo y del dosel vegetal, lo cual acelera la acumulación de unidades térmicas y anticipa la ocurrencia de fases fenológicas. Si bien esta precocidad puede resultar ventajosa para evitar heladas tardías o sequías terminales, simultáneamente incrementa la demanda evapotranspirativa y puede inducir estrés térmico durante floración si las temperaturas superan umbrales críticos. Las laderas con exposición sur, por contraste, experimentan desarrollo más lento, pero con menores requerimientos hídricos, equilibrio cuya conveniencia depende del régimen hídrico y térmico específico de cada localidad.

6.1.3 Historia del lote y rotación de cultivos

El análisis del historial productivo del lote permite identificar problemas potenciales de plagas, enfermedades, malezas o limitaciones nutricionales. La cebada se beneficia significativamente de rotaciones con leguminosas que aportan nitrógeno residual al sistema. Las mejores precedencias incluyen cultivos de hoja ancha como legumbres, papa o quinua, evitando la sucesión con otros cereales que comparten plagas y enfermedades (Pallo Toapanta, 2022).

La rotación adecuada contribuye a:

- Interrumpir ciclos de patógenos específicos
- Mejorar la estructura del suelo

- Optimizar el aprovechamiento de nutrientes
- Reducir la presión de malezas problemáticas
- Incrementar la biodiversidad del agroecosistema

6.2 Preparación del suelo

La preparación del suelo busca crear condiciones físicas óptimas para la germinación, emergencia y establecimiento del cultivo. El objetivo es lograr una cama de siembra con estructura granular fina en superficie, firmeza adecuada en profundidad y eliminación de impedancias físicas para el desarrollo radical.

6.2.1 *Labranza convencional*

a) Labranza convencional:

El sistema tradicional comprende una secuencia de operaciones mecánicas que se inician 2-3 meses previos a la siembra, sincronizándose idealmente con las primeras precipitaciones estacionales que ablandan el suelo y favorecen la descomposición biológica de residuos vegetales del cultivo precedente.

Arada primaria: Se ejecuta mediante arado de discos o vertederas que penetran 20-30 centímetros, invirtiendo el perfil edáfico para enterrar malezas, semillas de especies no deseadas y residuos culturales del ciclo anterior. Esta operación debe realizarse cuando el suelo alcanza humedad apropiada aproximadamente 60-70% de la capacidad de campo condición que permite fraccionamiento adecuado sin generar terrones excesivamente

grandes que dificulten operaciones subsecuentes, ni exceso de pulverización que destruya agregados estables y favorezca formación de costras superficiales. La labor en condiciones de humedad inadecuadas excesiva o deficiente induce compactación subsuperficial que restringe penetración radical y movimiento de agua, efecto denominado "piso de arado" que persiste durante años y compromete productividad.

Rastraje múltiple: Comprende 1-2 pasadas de rastra de discos en direcciones perpendiculares entre sí, fragmentando terrones remanentes de la arada y nivelando irregularidades superficiales. El rastraje final previo a siembra genera una cama mullida de 5-7 centímetros de profundidad, textura que optimiza el contacto íntimo semilla-suelo necesario para imbibición uniforme y emergencia sincronizada, minimizando bolsones de aire que retardan la germinación.

Nivelación de precisión: En terrenos con microrrelieve irregular depresiones, montículos la nivelación mediante tablón arrastrado o sistemas láser-guiados mejora sustancialmente la uniformidad de profundidad de siembra y emergencia, facilita la distribución uniforme de riegos superficiales cuando se emplean, y reduce la formación de charcos localizados que inducen anoxia radical y proliferación de patógenos edáficos.

b) Balance de ventajas y limitaciones

Las ventajas de la labranza convencional incluyen control mecánico efectivo de malezas anuales y perennes mediante destrucción física, incorporación homogénea de enmiendas orgánicas y fertilizantes de fondo en el perfil explorado por raíces, y preparación de cama de siembra

uniforme que facilita operaciones de siembra mecanizada y optimiza el establecimiento poblacional.

No obstante, presenta desventajas sustanciales que comprometen la sostenibilidad a mediano-largo plazo: incrementa dramáticamente la susceptibilidad a erosión hídrica y eólica por destrucción de estructura superficial y eliminación de cobertura protectora; acelera la mineralización de materia orgánica edáfica mediante oxigenación excesiva, reduciendo gradualmente los niveles de carbono orgánico; demanda alto consumo energético combustible, horas-máquina que incrementa costos de establecimiento; y deteriora progresivamente la estructura edáfica mediante pulverización de agregados, compactación subsuperficial y reducción de porosidad efectiva, efectos acumulativos que manifiestan sus consecuencias más severas tras décadas de monocultivo bajo laboreo intensivo repetido.

6.2.2 *Labranza mínima y siembra directa*

Los sistemas de labranza conservacionista han adquirido relevancia creciente por sus beneficios ambientales, económicos y agronómicos, particularmente en regiones donde la erosión constituye amenaza severa, los recursos hídricos presentan restricciones críticas, o los costos energéticos del laboreo convencional comprometen la viabilidad económica del sistema productivo.

a) *Labranza reducida o mínima:*

Este sistema simplifica drásticamente las operaciones de preparación edáfica, limitándolas a una labor superficial mediante cultivador de campo

o rastra liviana que remueve únicamente los primeros 10-15 centímetros del perfil, manteniendo parcialmente los residuos del cultivo precedente en la superficie. La preservación de estructura edáfica en estratos inferiores, combinada con la cobertura residual protectora, conserva más efectivamente la humedad edáfica reduciendo las pérdidas evaporativas directas, reduce los costos operativos entre 30-40% por menor consumo de combustible y tiempo-máquina, y mantiene niveles superiores de materia orgánica respecto a labranza convencional intensiva.

Este sistema se adapta particularmente bien a suelos de textura franca con estructura granular o migajosa naturalmente estable, baja densidad aparente que facilita penetración radical sin remoción profunda, y presión reducida de malezas perennes rizomatosas que requieren control mecánico mediante inversión del perfil. Resulta menos apropiado en suelos arcillosos mal estructurados susceptibles a compactación, o en situaciones con alta infestación de malezas problemáticas que demandan control mecánico repetido.

b) Siembra directa (no-till):

Representa el extremo de conservación en el espectro de sistemas de labranza, eliminando completamente las operaciones de preparación mecánica y colocando la semilla directamente sobre el rastrojo del cultivo anterior mediante sembradoras especializadas equipadas con cuchillas cortadoras que abren surcos estrechos a través de la cobertura vegetal y discos abresurcos que penetran el suelo sin removerlo lateralmente.

Este sistema demanda condiciones específicas para implementación exitosa:

- **Control químico efectivo de malezas:** La ausencia de laboreo mecánico que elimine vegetación competidora requiere aplicaciones de herbicidas no selectivos glifosato, paraquat previo a la siembra, con timing crítico que asegure mortalidad completa antes del establecimiento del cultivo.
 - **Sembradoras especializadas robustas:** Equipos con peso suficiente (frecuentemente superior a 200 kg por línea de siembra) para penetrar suelos sin laboreo previo, dotados de sistemas de corte de rastrojo eficientes y mecanismos de cierre del surco que aseguren contacto semilla-suelo adecuado.
 - **Manejo apropiado de rastrojos:** Cobertura entre 30-50% que equilibre protección contra erosión y evaporación con suficiente espacio para penetración de luz y minimización de interferencia física con la emergencia de plántulas.
 - **Ajuste nutricional:** Incremento en dosis de fertilización nitrogenada (10-15% adicional) para compensar la inmovilización temporal de nitrógeno por microorganismos que descomponen rastrojos con alta relación C:N, especialmente en los primeros años de transición hacia el sistema.
- c) *Beneficios documentados:*
- **Conservación hídrica:** Retención de humedad edáfica 20-30% superior respecto a labranza convencional, derivada de reducción dramática en evaporación directa por cobertura permanente e

incremento en infiltración por mantenimiento de macroporosidad continua y actividad biológica intensificada.

- **Control erosivo excepcional:** Reducción de pérdidas de suelo por erosión hídrica y eólica hasta 90%, efecto atribuible a la cobertura vegetal permanente que disipa la energía cinética de las gotas de lluvia, reduce la velocidad de escorrentía superficial y ancla el suelo contra transporte eólico.
- **Secuestro de carbono edáfico:** Incremento gradual pero sostenido de materia orgánica del suelo entre 0.1-0.2% anualmente, proceso que mejora propiedades físicas, químicas y biológicas mientras contribuye a mitigación del cambio climático mediante captura atmosférica de carbono.
- **Activación biológica:** Mejora sustancial de la actividad y diversidad de organismos edáficos lombrices, coleópteros, hongos micorrízicos que contribuyen al ciclado de nutrientes, formación de estructura y supresión biológica de patógenos.
- **Eficiencia económica:** Reducción significativa de costos operativos por eliminación de múltiples pasadas de maquinaria y disminución del tiempo entre cosecha del cultivo precedente y siembra del siguiente, permitiendo aprovechar ventanas climáticas óptimas.

6.3 Época de siembra

La determinación de la ventana temporal óptima para siembra representa una decisión estratégica de primer orden cuyas implicaciones condicionan la totalidad del ciclo productivo, influyendo decisivamente sobre el

rendimiento alcanzable, los atributos de calidad comercial del grano, la incidencia de plagas y enfermedades, y la eficiencia económica del sistema. Esta decisión debe fundamentarse en análisis integrado de factores climáticos régimen térmico y pluviométrico esperado, características varietales duración del ciclo, requerimientos de vernalización, sensibilidad fotoperiódica, y consideraciones de manejo integrado presión de malezas, disponibilidad de maquinaria, secuencia de cultivos en la rotación que interactúan de manera compleja para definir el balance óptimo entre oportunidades y riesgos.

6.3.1 Factores determinantes

a) Factores climáticos determinantes:

Régimen pluviométrico estacional: En sistemas de secano predominantes en la agricultura familiar andina, la siembra debe sincronizarse con el establecimiento consistente del período lluvioso, asegurando humedad edáfica suficiente en los primeros 30 centímetros del perfil para imbibición completa de semillas y emergencia uniforme de plántulas. En regiones andinas ecuatorianas, bolivianas y peruanas, esta ventana se establece típicamente entre octubre y diciembre, coincidiendo con la transición desde la estación seca hacia el período húmedo asociado a la convergencia intertropical. Siembras anticipadas arriesgan germinación irregular por déficit hídrico con necesidad de resiembras costosas, mientras que siembras tardías exponen las fases reproductivas a la finalización prematura de las lluvias, induciendo estrés hídrico terminal durante llenado de grano que reduce drásticamente rendimientos y calidad.

Régimen térmico: Las temperaturas óptimas para germinación y emergencia oscilan entre 20-22°C, rango que permite completar el proceso en 5-7 días. Siembras tempranas bajo temperaturas inferiores a 15°C prolongan excesivamente la emergencia hasta 12-15 días, incrementando la exposición a patógenos edáficos, predación por fauna y desecación por cambios microclimáticos, resultando en establecimientos poblacionales irregulares que comprometen la competitividad inicial del cultivo. Simultáneamente, debe evitarse que temperaturas superiores a 25°C durante el llenado de grano aceleren la senescencia foliar y acorten el período efectivo de acumulación de reservas, reduciendo peso hectolítrico indicador crítico de calidad maltera y contenido de almidón.

Respuesta fotoperiódica varietal: Los cultivares exhiben sensibilidades fotoperiódicas diferenciadas que condicionan sus áreas de adaptación geográfica. Las variedades de primavera son generalmente insensibles o débilmente sensibles al fotoperiodo, iniciando la transición floral primordialmente en función de tiempo térmico acumulado, lo cual les confiere flexibilidad en fechas de siembra y adaptación a latitudes tropicales-subtropicales con fotoperíodos relativamente constantes. Las variedades de invierno requieren vernalización exposición prolongada a temperaturas bajas entre 0-5°C durante 4-8 semanas y posteriormente responden a fotoperíodos largos superiores a 12-14 horas luz para inducción floral sincronizada, restricción que limita su cultivo a regiones templadas con estacionalidad térmica pronunciada.

Riesgo de heladas tardías: En territorios con ocurrencia frecuente de heladas tardías primaverales común en altiplanos andinos por encima de 2,800 metros, la programación de siembra debe calcularse para que la

floración fase de máxima vulnerabilidad ocurra posterior al período estadístico de última helada. Temperaturas inferiores a -2°C durante antesis causan mortalidad del polen, colapso de los órganos florales y esterilidad de espiguillas, reduciendo dramáticamente el número de granos por espiga. El análisis de series históricas de temperatura mínima permite identificar la probabilidad de ocurrencia de heladas tardías y ajustar fechas de siembra según la duración del ciclo varietal, incorporando márgenes de seguridad que minimicen riesgos de exposición sin retrasar excesivamente la siembra.

6.3.2 Épocas recomendadas por región

En la región interandina ecuatoriana (2400-3300 msnm), la época óptima se extiende de octubre a diciembre, aprovechando las precipitaciones del período lluvioso. En zonas bajas con riego, es posible realizar siembras de mayo a julio para aprovechar mejores precios de mercado.

Las siembras tempranas dentro del período óptimo generalmente producen mayores rendimientos debido a:

- Mayor duración del ciclo vegetativo
- Mejor aprovechamiento de la radiación solar
- Menor presión de enfermedades foliares
- Escape a períodos de déficit hídrico terminal

6.4 Densidad y arreglo espacial

La densidad de siembra determina la población inicial de plantas y su capacidad de compensación mediante el macollamiento. El objetivo es establecer una población que maximice la intercepción de radiación sin generar competencia intraespecífica excesiva.

6.4.1 Densidad óptima de plantas

La densidad objetivo varía según el potencial productivo del ambiente:

- **Ambientes de alto potencial (>4 t/ha):** 250-300 plantas/m²
- **Ambientes de potencial medio (2-4 t/ha):** 200-250 plantas/m²
- **Ambientes restrictivos (<2 t/ha):** 150-200 plantas/m²

Estas densidades consideran la compensación mediante macollamiento, esperando obtener 400-600 espigas/m² en cosecha, dependiendo del número de macollos fértiles por planta.

6.4.2 Cálculo de la densidad de siembra

La cantidad de semilla requerida se calcula mediante la fórmula:

$$\text{Kg/ha} = (\text{Plantas objetivo/m}^2 \times \text{PMG} \times 100) / (\% \text{ Germinación} \times \% \text{ Pureza} \times \text{Factor de logro})$$

Donde:

- PMG = Peso de mil granos (35-45 g)
- Factor de logro = 0.85-0.95 (pérdidas por emergencia)

Para condiciones típicas:

- **Siembra manual al voleo:** 140-180 kg/ha
- **Siembra mecanizada en líneas:** 110-140 kg/ha
- **Siembra de precisión:** 90-110 kg/ha

6.4.3 Arreglo espacial

Distancia entre hileras: El espaciamiento estándar varía entre 15-20 cm, con tendencia hacia distancias menores (12-15 cm) en sistemas de alta productividad. Espaciamientos reducidos mejoran:

- Distribución uniforme de plantas
- Competencia con malezas
- Intercepción de radiación
- Eficiencia de uso del agua

Distribución en la hilera: La uniformidad de distribución es crítica para minimizar la competencia intraespecífica. Coeficientes de variación superiores al 40% en la distribución reducen el rendimiento en 5-10%.

6.5 Profundidad de siembra

La profundidad de siembra influye directamente en la velocidad y uniformidad de emergencia, el vigor inicial de las plántulas y el establecimiento del cultivo (Vicente Jiménez et al., 2021).

6.5.1 Profundidad óptima

La profundidad ideal oscila entre 2.5 y 4.0 cm, permitiendo:

- Mantener contacto adecuado con la humedad del suelo
- Tener una protección contra desecación superficial
- Emergencia uniforme en 8-12 días
- Desarrollo normal del coleóptilo

6.5.2 Factores de ajuste

Textura del suelo: En suelos arenosos, aumentar a 4-5 cm para alcanzar humedad estable. En suelos arcillosos, reducir a 2-3 cm para facilitar la emergencia.

Humedad disponible: Con buena humedad superficial, sembrar a 2-3 cm. En condiciones secas, profundizar hasta encontrar humedad, sin exceder 6 cm.

Tamaño de semilla: Semillas grandes (PMG >40 g) toleran mayor profundidad que semillas pequeñas (PMG <35 g).

Temperatura del suelo: En siembras tempranas con suelo frío, reducir profundidad para acelerar la emergencia.

6.5.3 Consecuencias del mal manejo

Siembra superficial (<2 cm):

- Desecación de semillas

- Emergencia desuniforme
- Mayor susceptibilidad a daño por pájaros
- Desarrollo deficiente del sistema radical

Siembra profunda (>6 cm):

- Agotamiento de reservas antes de emerger
- Plántulas débiles y cloróticas
- Emergencia retardada y desuniforme
- Reducción del stand de plantas (20-30%)

6.6 Métodos de siembra

La elección del método de siembra depende de la disponibilidad de maquinaria, topografía del terreno, tamaño de la explotación y nivel tecnológico del productor (Campuzano-Duque et al., 2022).

6.6.1 *Siembra al voleo*

Método tradicional ampliamente utilizado en agricultura de pequeña escala. La distribución manual o con voleadora mecánica requiere 15-25% más semilla que la siembra en líneas.

Ventajas:

- Bajo costo de implementación
- Rapidez de operación

- Adaptable a terrenos irregulares
- No requiere maquinaria especializada

Desventajas:

- Distribución irregular
- Profundidad variable
- Mayor competencia intraespecífica
- Dificultad para control mecánico de malezas

Recomendaciones técnicas:

- Dividir la semilla en dos porciones para pasadas cruzadas
- Incorporar mediante rastra ligera o paso de ganado
- Evitar días ventosos
- Calibrar la voleadora para uniformidad

6.6.2 Siembra en líneas

Sistema mecanizado que proporciona distribución uniforme y profundidad constante, optimizando el uso de semilla y facilitando labores posteriores.

a) *Tipos de sembradoras:*

Tecnologías de siembra mecanizada:

Sembradoras de chorrillo continuo: Distribuyen semilla de manera ininterrumpida a lo largo de la línea mediante mecanismos dosificadores basados en rodillos acanalados o placas perforadas que permiten flujo regulado pero no individualizado. Resultan apropiadas para establecer densidades poblacionales elevadas superiores a 300 plantas por metro cuadrado con distanciamientos reducidos entre hileras de 15-20 centímetros, configuración que favorece cobertura rápida del suelo, supresión competitiva de malezas y maximización de intercepción lumínica durante fases vegetativas tempranas. Constituyen la tecnología más difundida en sistemas cerealeros convencionales por su menor costo de adquisición, simplicidad operativa y versatilidad para diversos tipos de semilla.

Sembradoras neumáticas de precisión: Dosifican semillas individualmente mediante sistemas de vacío o presión positiva que capturan granos desde un reservorio y los depositan con espaciamiento uniforme predefinido dentro de cada hilera. Esta tecnología reduce el consumo de semilla entre 20-30% respecto a sembradoras de chorrillo al eliminar competencia intraespecífica temprana derivada de acumulaciones localizadas, manteniendo las poblaciones objetivo con mayor eficiencia. Adicionalmente, la distribución espacial homogénea optimiza la disponibilidad individual de recursos luz, agua, nutrientes y facilita el macollamiento equilibrado. Sin embargo, demandan mayor inversión inicial, calibración más cuidadosa según tamaño y forma del grano, y velocidades operativas reducidas para mantener precisión en la colocación.

Sembradoras para siembra directa: Equipos especializados diseñados para operar sobre suelos sin preparación previa, equipados con discos

cortadores que seccionan la cobertura de rastrojos, abresurcos robustos frecuentemente tipo bota o disco doble inclinado que penetran el perfil no labrado, y ruedas compactadoras posteriores que cierran el surco y aseguran contacto íntimo semilla-suelo. Requieren peso sustancial 150-200 kilogramos por línea de siembra para generar la fuerza de penetración necesaria en suelos consolidados sin inducir compactación excesiva. La inversión requerida resulta significativamente superior a sembradoras convencionales, pero se justifica en sistemas donde los beneficios de conservación edáfica y eficiencia operativa de la siembra directa compensan los costos de equipamiento especializado.

6.6.3 *Siembra aérea*

Utilizada en áreas de difícil acceso o para resembrar zonas con fallas. La distribución mediante avioneta o dron requiere condiciones específicas:

- Velocidad del viento <10 km/h
- Humedad superficial del suelo adecuada
- Incremento del 30-40% en densidad de siembra
- Peletización de semilla para mejorar balística

6.7 *Calidad de semilla*

La calidad de la semilla constituye el factor fundamental para el establecimiento exitoso del cultivo, determinando el vigor inicial, la uniformidad de emergencia y el potencial productivo.

6.7.1 Componentes de la calidad

Calidad genética: Garantiza la identidad y pureza varietal. La semilla certificada debe presentar mínimo 98% de pureza varietal, asegurando la expresión de las características agronómicas deseadas.

Calidad física: Incluye pureza física (mínimo 98%), contenido de humedad (12-14%), peso hectolítrico (>56 kg/hl) y ausencia de daño mecánico. Semillas con peso específico superior generan plántulas más vigorosas (Pazuña Mayorga, 2025).

Calidad fisiológica:

- **Germinación:** Mínimo 85% para semilla certificada
- **Vigor:** Evaluado mediante pruebas de envejecimiento acelerado o frío
- **Viabilidad:** Determinada por prueba de tetrazolio
- **Velocidad de germinación:** IVG >8 para siembras en condiciones adversas

Calidad sanitaria: Ausencia de patógenos transmisibles por semilla como *Ustilago nuda* (carbón desnudo), *Pyrenophora graminea* (mancha en red) y nematodos. El tratamiento de semilla es fundamental para prevenir infecciones tempranas.

6.7.2 *Tratamiento de semilla*

El tratamiento protege la semilla y plántula durante las etapas críticas de germinación y emergencia.

Tratamiento fungicida:

- Productos sistémicos (tebuconazole, prothioconazole) para carbones
- Productos de contacto (thiram, captan) para pythium y fusarium
- Dosis: 1-2 ml/kg de semilla

Tratamiento insecticida:

- Neonicotinoides (imidacloprid, thiamethoxam) para gusanos alambre y pulgones
- Período de protección: 30-45 días post-emergencia
- Dosis: 0.5-1 ml/kg de semilla

Inoculación con microorganismos benéficos:

- *Azospirillum brasilense*: Fijación asociativa de nitrógeno
- *Pseudomonas fluorescens*: Solubilización de fósforo
- *Trichoderma harzianum*: Control biológico de patógenos

6.7.3 Almacenamiento y conservación

Condiciones óptimas:

- Temperatura: 10-15°C
- Humedad relativa: 50-60%
- Contenido de humedad de la semilla: 12-13%
- Ventilación adecuada para prevenir condensación

Pérdida de viabilidad: La longevidad de la semilla sigue la ecuación de Roberts: $v = K_i - p/10^{(KE-CWT-CHmc^2)}$

Donde la viabilidad disminuye con el incremento de temperatura y humedad. En condiciones óptimas, la cebada mantiene germinación superior al 80% durante 3-4 años.

6.7.4 Pruebas de calidad

Análisis de rutina:

- Pureza física (ISTA Rules)
- Germinación estándar (20°C, 7 días)
- Contenido de humedad (método de estufa)
- Peso de mil semillas

Análisis especializados:

- Vigor por conductividad eléctrica
- Sanidad por blotter test
- Identificación varietal por electroforesis
- Detección de OGM por PCR

6.8 Conclusiones del capítulo

El establecimiento exitoso del cultivo demanda integración coherente de múltiples componentes técnicos selección de lote, preparación edáfica, época de siembra, calidad de semilla, densidad poblacional, profundidad de colocación cuyas interacciones generan efectos sinérgicos o antagónicos sobre el desempeño productivo subsecuente. Las decisiones implementadas durante esta fase crítica ejercen impactos multiplicativos sobre el rendimiento final, dado que deficiencias en el establecimiento raramente se compensan mediante intensificación del manejo en fases posteriores. Un establecimiento deficiente poblaciones subóptimas, emergencia irregular, plántulas débiles compromete irreversiblemente el potencial productivo, mientras que un establecimiento óptimo genera las condiciones para expresión plena de las capacidades genéticas del material cultivado.

La adopción creciente de sistemas de agricultura conservacionista particularmente siembra directa representa simultáneamente una respuesta a imperativos de sostenibilidad ambiental conservación de suelos, secuestro de carbono, preservación de biodiversidad edáfica y una

estrategia económicamente viable que reduce costos operativos, optimiza el uso de maquinaria y mejora la resiliencia productiva ante variabilidad climática. No obstante, estos sistemas demandan mayor sofisticación técnica, comprensión profunda de procesos edáficos y biológicos, y capacidad de gestión adaptativa que ajuste prácticas según condiciones específicas de cada ciclo productivo, requisitos que frecuentemente constituyen barreras para adopción en contextos de agricultura familiar con acceso limitado a asistencia técnica especializada.

La inversión en semilla certificada de calidad comprobada, aunque representa erogaciones iniciales superiores en 30-50% respecto a semilla de agricultor no certificada, se justifica ampliamente por incrementos documentados en rendimiento entre 15-25%, uniformidad poblacional que facilita operaciones mecanizadas subsecuentes, vigor inicial superior que confiere competitividad frente a malezas, y reducción significativa en la incidencia de problemas fitosanitarios transmitidos por semilla. El tratamiento profesional de semillas con fungicidas, insecticidas y bioestimulantes debe considerarse práctica estándar indispensable antes que opcional, dado que constituye la intervención con mayor retorno económico frecuentemente superior a 300% de beneficio sobre costo dentro del paquete tecnológico del cultivo.

El ajuste de densidad y profundidad de siembra requiere calibración específica según condiciones edafoclimáticas locales, características varietales y objetivos productivos, evitando la aplicación mecánica de recomendaciones generales desarrolladas en contextos diferentes. La capacidad de observación sistemática del productor evaluación de emergencia, identificación temprana de problemas, reconocimiento de

variabilidad intrapredial combinada con conocimiento técnico fundamentado, determina sustancialmente el éxito en establecimiento y la capacidad de implementar ajustes correctivos oportunos cuando las condiciones reales divergen de las expectativas planificadas.

Finalmente, la planificación anticipada integral del establecimiento considerando disponibilidad de recursos financieros y operativos, condiciones climáticas esperadas según análisis histórico y pronósticos estacionales, objetivos de producción y mercados destino permite optimizar secuencialmente cada operación descrita, asegurando sincronización apropiada entre actividades, disponibilidad oportuna de insumos críticos y ejecución técnicamente correcta de prácticas que colectivamente sientan las bases para un sistema productivo de cebada eficiente, rentable y ambientalmente sostenible que contribuya tanto a objetivos económicos privados como a metas colectivas de seguridad alimentaria y conservación de recursos naturales.

CAPÍTULO VII

7 NUTRICIÓN Y FERTILIZACIÓN

La nutrición mineral es uno de los pilares de la productividad del cultivo de cebada, ya que determina la formación de macollos, el desarrollo de espigas y la calidad final del grano. Este capítulo aborda los requerimientos nutricionales del cultivo, los roles fisiológicos de los macronutrientes y micronutrientes, y las consecuencias de sus deficiencias o excesos. Se analizan los procesos de absorción y movilidad de nutrientes dentro de la planta, así como la interacción entre fertilización, pH del suelo, materia orgánica y disponibilidad hídrica.

Asimismo, se discuten estrategias modernas de fertilización edáfica y foliar, el uso de enmiendas, biofertilizantes y tecnologías como liberación controlada o fertilización sitio-específica. La articulación entre diagnóstico del suelo, análisis foliar y curvas de absorción permite establecer programas de nutrición eficientes y ambientalmente responsables.

7.1 Requerimientos nutricionales

El cultivo de *H. vulgare* presenta demandas nutricionales diferenciadas temporal y cuantitativamente que deben satisfacerse de manera sincronizada con las fases fenológicas para optimizar tanto la productividad como los atributos de calidad comercial del grano. La absorción de nutrientes no ocurre de forma uniforme a lo largo del ciclo, sino que exhibe patrones de acumulación específicos estrechamente vinculados con los procesos fisiológicos dominantes en cada etapa de desarrollo.

Durante las fases de macollamiento y encañado período de máxima actividad meristemática y expansión foliar, la demanda de nitrógeno se intensifica dramáticamente para sustentar la síntesis proteica asociada con formación de nuevos tejidos, multiplicación celular en tallos secundarios y desarrollo del área foliar fotosintéticamente activa. Simultáneamente, el fósforo resulta crítico por su función estructural en ácidos nucleicos, fosfolípidos de membrana y compuestos energéticos (ATP) que impulsan procesos metabólicos de alta demanda como división celular y elongación radical.

Durante la fase reproductiva, particularmente el llenado de grano, la demanda relativa se desplaza hacia potasio elemento esencial en translocación de fotosintatos desde tejidos fuente hacia granos en desarrollo, regulación osmótica y activación de enzimas involucradas en síntesis de almidón y micronutrientes específicos como boro fundamental para viabilidad polínica y fecundación, zinc cofactor de enzimas implicadas en metabolismo de carbohidratos y manganeso requerido en fotosíntesis y síntesis de proteínas. La deficiencia de estos elementos durante ventanas críticas compromete irreversiblemente componentes del rendimiento, efecto que no se compensa mediante aplicaciones tardías una vez que el daño fisiológico se ha establecido.

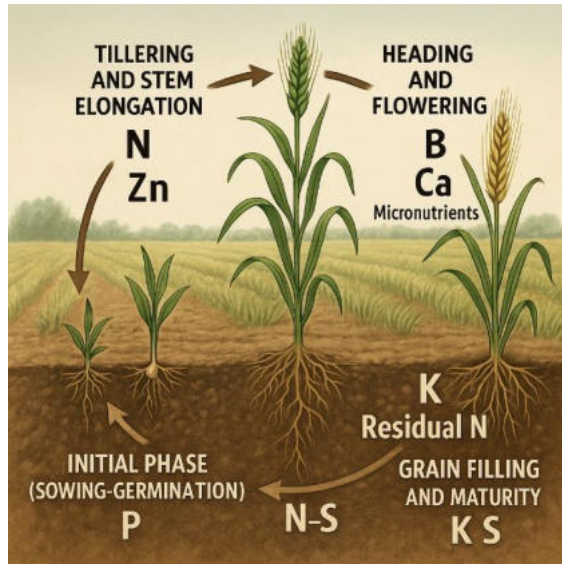


Figura 27. Ciclo de absorción de nutrientes en la cebada.

La nutrición adecuada no solo influye en el rendimiento, sino también en parámetros de calidad industrial como el contenido de proteína, peso hectolítrico y peso de mil granos, de relevancia en la industria maltera y alimentaria.

Tabla 1. Requerimientos nutricionales aproximados de cebada por tonelada de grano producido.

Nutriente	Extracción (kg/tn de grano)	Principales funciones
Nitrógeno (N)	25 – 30	Síntesis de proteínas, biomasa foliar, fotosíntesis
Fósforo (P ₂ O ₅)	10 – 12	Desarrollo radicular, energía (ATP)

Potasio (K ₂ O)	25 – 35	Regulación osmótica, transporte de fotosintatos
Calcio (CaO)	6 – 8	Integridad de paredes celulares
Magnesio (MgO)	3 – 5	Componente de clorofila
Azufre (S)	3 – 4	Aminoácidos azufrados (cisteína, metionina)
Micronutrientes (Zn, B, Fe, Mn, Cu)	50 – 300 g	Enzimas, polinización, respiración celular

Fuente: Adaptado de Garrido (2019) y Suarez (2022).

7.2 Diagnóstico de la fertilidad del suelo

El análisis de suelos es la herramienta fundamental para establecer programas de fertilización. Este diagnóstico determina el pH, la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la disponibilidad de macro y micronutrientes.

En cebada, el pH óptimo se ubica entre 6.0 y 7.5. Valores menores a 5.5 generan deficiencia de fósforo y toxicidad por aluminio, mientras que valores superiores a 8.0 puede generar una limitación de nutrientes Zn y Fe (Athnere et al., 2024a).

Tabla 2. Rangos críticos de fertilidad del suelo para cebada.

Parámetro	Óptimo	Limitante
pH	6.0 – 7.5	< 5.5 o > 8.0
Materia orgánica	2 – 4 %	< 2 %
Nitrógeno disponible	20 – 40 mg/kg	< 15 mg/kg
Fósforo disponible (Olsen)	15 – 30 mg/kg	< 12 mg/kg
Potasio intercambiable	150 – 250 mg/kg	< 120 mg/kg
CIC	15 – 25 meq/100g	< 10 meq/100g

7.3 Macronutrientes primarios (N, P, K)

- **Nitrógeno (N):** regula el crecimiento y el contenido de proteína en el grano. En exceso, reduce la calidad maltera, mientras que su deficiencia disminuye el rendimiento (Castro, 2019).
- **Fósforo (P):** esencial en la fase inicial, favorece un sistema radicular robusto y mejora el macollamiento.
- **Potasio (K):** incrementa la tolerancia al estrés hídrico, mejora el llenado de grano y la resistencia a enfermedades.

Tabla 3. Recomendaciones generales de fertilización (kg/ha).

Destino del cultivo	N (kg/ha)	P2O5 (kg/ha)	K2O (kg/ha)
Cebada maltera	80 – 100	40 – 60	60 – 80
Cebada forrajera	100 – 120	50 – 70	70 – 90
Cebada alimenticia	90 – 110	40 – 60	60 – 80

Fuente: Caluguillín (2023); Falconi et al. (2010).

7.4 Macronutrientes secundarios (Ca, Mg, S)

El calcio (Ca) desempeña funciones estructurales fundamentales al constituir componente esencial de la lámina media de paredes celulares mediante pectatos de calcio que confieren rigidez mecánica a los tejidos, reducen susceptibilidad al acamado y mejoran resistencia a penetración de patógenos. Adicionalmente, actúa como segundo mensajero en cascadas de señalización celular que regulan respuestas a estreses ambientales y facilita la absorción de otros cationes mediante mantenimiento de integridad de membranas plasmáticas.

El magnesio (Mg) constituye el átomo central de la molécula de clorofila, resultando absolutamente indispensable para fotosíntesis. Representa aproximadamente el 2.7% del peso molecular de la clorofila y su deficiencia induce clorosis intervenal característica inicialmente en hojas maduras por ser elemento móvil que se transloca hacia tejidos jóvenes bajo condiciones limitantes. Adicionalmente, actúa como cofactor de enzimas involucradas en metabolismo de carbohidratos y síntesis de ácidos nucleicos, participando en procesos de fosforilación energética.

El azufre (S) constituye componente estructural de aminoácidos esenciales cisteína, metionina que determinan la calidad proteica del grano. Interviene en la síntesis de proteínas de almacenamiento del endospermo y enzimas específicas involucradas en metabolismo nitrogenado. Deficiencias de azufre generan acumulación de formas nitrogenadas no proteicas y reducen la eficiencia de utilización del nitrógeno, manifestándose en clorosis generalizada de hojas jóvenes a diferencia del nitrógeno que afecta primero hojas senescentes y reducción del contenido proteico del grano que compromete calidad maltera o forrajera.

Las deficiencias de estos elementos secundarios se manifiestan inicialmente como clorosis foliar con patrones específicos según el nutriente involucrado, reducción del vigor vegetativo, elongación intermodal deficiente, y finalmente disminución sustancial de la productividad tanto por reducción en componentes del rendimiento número de espigas, granos por espiga como por compromiso de atributos cualitativos que afectan valor comercial del producto

7.5 Micronutrientes esenciales

Aunque demandados en cantidades reducidas —miligramos por kilogramo de tejido vegetal—, los micronutrientes ejercen funciones bioquímicas insustituibles cuya deficiencia genera desórdenes fisiológicos desproporcionados respecto a las cantidades involucradas:

Boro (B): Elemento crítico para germinación polínica, elongación del tubo polínico y fecundación exitosa. Deficiencias durante floración resultan en esterilidad de flores, reducción drástica del número de granos por espiga y formación de granos malformados. Adicionalmente, participa en

transporte de carbohidratos a través de membranas y fortalecimiento de paredes celulares mediante entrecruzamiento de pectinas, afectando la formación apropiada de espigas y la arquitectura estructural de la planta.

Zinc (Zn): Cofactor de enzimas involucradas en síntesis de triptófano, precursor de auxinas que regulan elongación celular y dominancia apical. Deficiencias inducen reducción del macollamiento efectivo por alteración hormonal, acortamiento de entrenudos, y clorosis intervenal en hojas jóvenes. Resulta particularmente crítico en suelos alcalinos o con altos contenidos de fósforo que inducen antagonismo químico reduciendo su disponibilidad.

Hierro (Fe): Componente esencial de citocromos involucrados en cadena respiratoria y fotosíntesis, así como de enzimas que catalizan síntesis de clorofila. Deficiencias generan clorosis severa en hojas jóvenes —por ser elemento inmóvil que no se transloca desde tejidos maduros— manifestándose como amarillamiento uniforme que puede progresar hasta necrosis si la deficiencia persiste.

Manganeso (Mn): Activador de múltiples enzimas del metabolismo, particularmente aquellas involucradas en fotólisis del agua durante fotosíntesis y síntesis de aminoácidos aromáticos. Deficiencias se manifiestan como moteado clorótico intervenal en hojas maduras y reducción de la eficiencia fotosintética que limita acumulación de biomasa.

Cobre (Cu): Constituyente de enzimas oxidasas involucradas en lignificación de paredes celulares, proceso que incrementa rigidez estructural del tallo reduciendo susceptibilidad al acamado y fortalece barreras físicas contra penetración de patógenos fúngicos y bacterianos.

Deficiencias resultan en tallos débiles, espigas estériles y mayor susceptibilidad a enfermedades.

En los suelos de la Sierra ecuatoriana, derivados frecuentemente de cenizas volcánicas con reacción ácida y alta capacidad de fijación, las deficiencias de zinc y boro resultan particularmente comunes. Estos andosoles presentan altos contenidos de alófana y complejos orgánicos que inducen quelación fuerte de micronutrientes catiónicos, reduciendo drásticamente su disponibilidad para absorción radical. En este contexto edáfico específico, la aplicación foliar de micronutrientes —que bypasa las limitaciones de disponibilidad edáfica mediante absorción directa a través de estomas y cutícula— constituye estrategia técnica y económicamente eficaz para corregir deficiencias durante fases críticas del desarrollo, particularmente previo a floración cuando la demanda de boro se intensifica y durante macollamiento cuando el zinc resulta determinante para establecer el número definitivo de tallos fértiles.

7.6 Programas de fertilización

El diseño de un programa de fertilización debe considerar:

1. Análisis de suelos.
2. Finalidad del cultivo (forrajero, maltero o alimenticio).
3. Disponibilidad de biofertilizantes y bioestimulantes.
4. Manejo de riego y prácticas culturales.

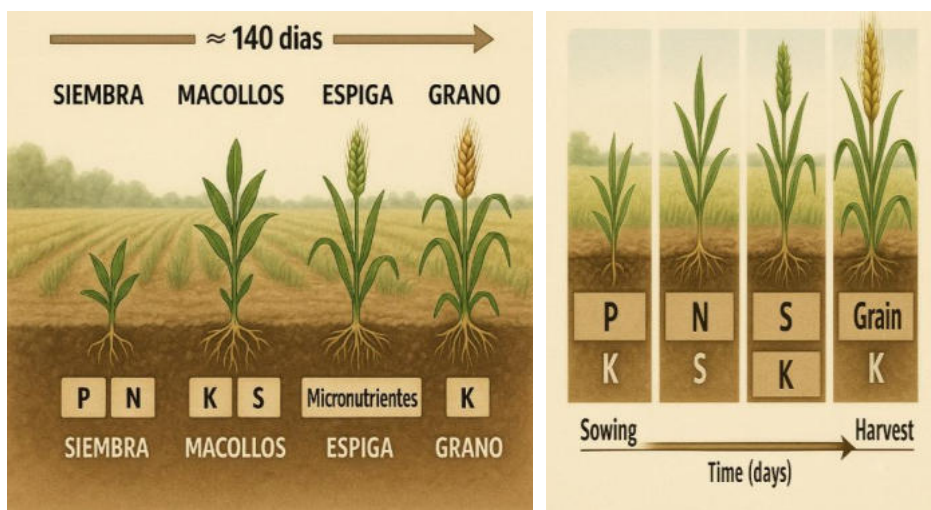


Figura 28. Cronograma de fertilización por etapas fenológicas.

Tabla 4. Programa de fertilización referencial para cebada maltera (por hectárea).

Etapa	Nutriente aplicado	Fuente	Dosis (kg/ha)
Siembra	P y K	Fosfato diamónico + KCl	40 – 60 P ₂ O ₅ / 40 – 60 K ₂ O
Macollamiento	N (50 %)	Urea o Nitrato amónico	40 – 50 N
Encañado	N (50 %) + S	Urea + Sulfato de amonio	40 – 50 N / 20 – 30 S
Espigamiento	Micronutrientes (Zn, B, Mn)	Foliar	Según diagnóstico

7.7 Fertilización foliar y bioestimulantes

La fertilización foliar es particularmente útil para suplir deficiencias rápidas y mejorar la eficiencia de nutrientes como Zn y B. Los

bioestimulantes, como extractos de algas, ácidos húmicos y citoquininas, mejoran la absorción de nutrientes, potencian la tolerancia al estrés y aumentan la productividad (Shilev et al., 2024).

Tabla 5. Bioestimulantes y efectos en cebada.

Bioestimulante	Principales efectos	Observaciones
Extracto de algas	Mejora vigor y coloración; estimula crecimiento	Aplicar en macollamiento y espigamiento
Ácidos húmicos	Incrementa absorción de N y P; estimula raíces	Aplicar en suelos de baja fertilidad
Citoquininas	Promueven división celular, llenado de grano	Eficaces en etapas reproductivas
Calcio-boro	Fortalece paredes celulares y polinización	Alta eficiencia en la variedad Cañicapa
Plata coloidal	Acción fungicida y bioestimulante	Aplicar preventivamente

7.8 Manejo integrado de la nutrición

El manejo integrado de la nutrición (MIN) combina fertilización química, orgánica y bioestimulantes, bajo criterios de sostenibilidad ambiental.

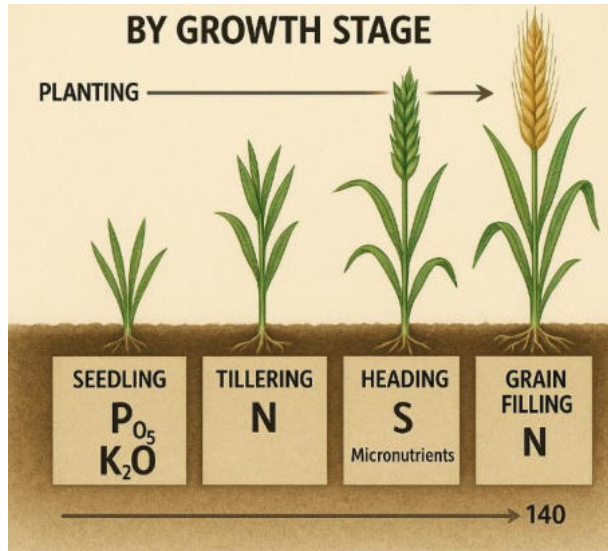


Figura 29. Manejo integrado de la nutrición (MIN).

Este enfoque incluye:

- Rotación de cultivos para mejorar la estructura del suelo.
- Uso de abonos verdes y materia orgánica.
- Aplicación de fertilización química basada en análisis de suelos.
- Incorporación de bioestimulantes para potenciar la eficiencia.

El MIN en cebada no solo asegura altos rendimientos, sino también la conservación del suelo y la reducción de la dependencia de insumos externos, alineándose con prácticas de agricultura sostenible (Kalee & Raheem, 2024).

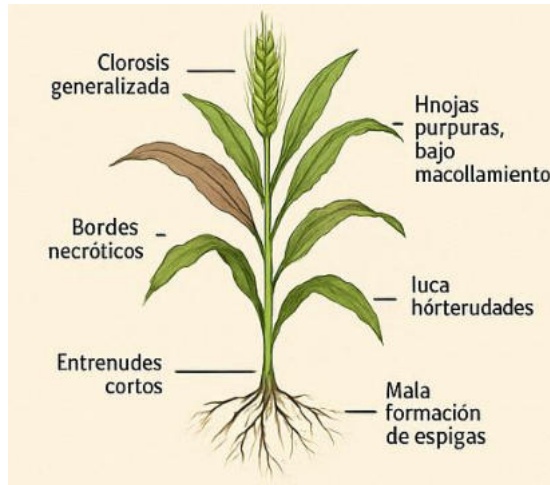


Figura 30. Deficiencias nutricionales en cebada.

7.9 Conclusiones del capítulo

El manejo nutricional apropiado del cultivo constituye eje fundamental para alcanzar rendimientos elevados y asegurar atributos de calidad contenido proteico, peso hectolítrico, poder diastásico que determinan la aptitud industrial del grano para maltería, alimentación animal o consumo humano directo. Los requerimientos nutricionales exhiben variabilidad temporal pronunciada según la fase fenológica, demandando programas de fertilización dinámicos que sincronicen la disponibilidad de nutrientes con los períodos de máxima demanda fisiológica, evitando tanto deficiencias que limiten procesos metabólicos críticos como excesos que induzcan desequilibrios, costos innecesarios y riesgos ambientales por lixiviación o volatilización.

El diagnóstico riguroso de la fertilidad edáfica mediante análisis físico-químicos determinación de pH, materia orgánica, macronutrientes disponibles, micronutrientes extraíbles, capacidad de intercambio

catiónico permite identificar limitantes específicas como deficiencias de fósforo en suelos ácidos donde la fijación reduce disponibilidad, insuficiencia de nitrógeno en sistemas sin historial de fertilización adecuada, o carencias de micronutrientes en suelos alcalinos donde la solubilidad disminuye drásticamente. Este diagnóstico constituye el punto de partida indispensable para formular recomendaciones técnicas contextualizadas que previenen desequilibrios nutricionales, optimizan la eficiencia de conversión de fertilizantes aplicados en incrementos de rendimiento, y minimizan pérdidas económicas asociadas a aplicaciones excesivas o desbalanceadas.

Los macronutrientes primarios nitrógeno, fósforo y potasio mantienen su posición central en los programas de fertilización por las cantidades demandadas y su impacto directo sobre componentes del rendimiento. No obstante, los elementos secundarios calcio, magnesio, azufre y los micronutrientes zinc, boro, hierro, manganeso, cobre ejercen funciones fisiológicas insustituibles, particularmente durante la fase reproductiva donde deficiencias marginales comprometen procesos críticos como viabilidad polínica, fecundación, síntesis de proteínas de almacenamiento y llenado de grano. La omisión de estos elementos genera deficiencias inicialmente subclínicas que posteriormente se manifiestan como síntomas visibles clorosis, necrosis, malformaciones y reducciones significativas en parámetros productivos rendimiento total, peso de grano y cualitativos contenido proteico, uniformidad que afectan severamente el valor comercial del producto.

La implementación de programas de fertilización debe considerar el destino comercial del cultivo maltero con requisitos estrictos de contenido

proteico entre 10-11.5%, forrajero donde se prioriza rendimiento total sin restricciones proteicas severas, o alimenticio para consumo humano donde atributos nutricionales adquieren relevancia así como las condiciones edafoclimáticas específicas que modulan la disponibilidad de nutrientes y las tasas de mineralización de materia orgánica. Este enfoque demanda flexibilidad y capacidad de ajuste según el contexto productivo particular, rechazando recomendaciones generales que ignoran la heterogeneidad inherente a sistemas agrícolas reales.

El uso complementario de fertilización foliar y bioestimulantes extractos de algas, ácidos húmicos-fúlvicos, aminoácidos, microorganismos benéficos se presenta como alternativa técnica y económicamente eficaz para corregir deficiencias puntuales que emergen durante el ciclo, mejorar la absorción y translocación de nutrientes mediante estimulación de procesos fisiológicos, e incrementar la tolerancia a estreses abióticos sequía, temperaturas extremas mediante inducción de mecanismos de osmoprotección y síntesis de metabolitos secundarios protectores.

Finalmente, el Manejo Integrado de la Nutrición (MIN) emerge como estrategia holística que combina sinérgicamente fertilización orgánica estiércoles compostados, abonos verdes que mejoran propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo a largo plazo; fertilización mineral que satisface demandas nutricionales inmediatas con precisión; y bioestimulantes que potencian procesos fisiológicos y eficiencia de uso de nutrientes. Esta integración no solamente optimiza producción y calidad del grano en el corto plazo, sino que promueve conservación y mejoramiento progresivo de la fertilidad edáfica, mantenimiento de funciones ecosistémicas del suelo ciclado de nutrientes, secuestro de

carbono, regulación hídrica y sostenibilidad del sistema agrícola en horizontes temporales medianos y largos, armonizando objetivos de productividad económica con imperativos de conservación de recursos naturales y resiliencia ante perturbaciones climáticas crecientemente frecuentes e intensas.

CAPÍTULO VIII

8 MANEJO DEL AGUA

El agua es un factor determinante en el rendimiento de la cebada, especialmente en regiones de altura donde las lluvias son irregulares y las temperaturas bajas limitan la disponibilidad hídrica en el suelo. Este capítulo explica cómo la demanda de agua varía a lo largo del ciclo fenológico, desde la germinación hasta el llenado de grano, identificando los momentos críticos en los que el déficit hídrico afecta mayormente la productividad.

Se analizan los fundamentos del balance hídrico, la evapotranspiración, la eficiencia de uso del agua y los métodos de riego más adecuados para distintos sistemas productivos. También se incluyen estrategias de conservación de humedad en el suelo, uso de coberturas vegetales, riego tecnificado, captación de agua lluvia y prácticas de manejo orientadas a reducir el estrés hídrico ante escenarios de variabilidad climática.

El agua representa un factor crítico en la producción de *H. vulgare*, condicionando directamente el crecimiento, desarrollo y expresión del potencial productivo. Aunque la especie exhibe tolerancia destacable al déficit hídrico comparada con otros cereales, la optimización del rendimiento y calidad demanda manejo eficiente del recurso. Este capítulo examina los fundamentos del manejo hídrico, desde el análisis del balance hasta estrategias diferenciadas según sistemas productivos.

8.1 Balance hídrico del cultivo

8.1.1 Conceptos fundamentales

El balance hídrico constituye la contabilidad cuantitativa de entradas y salidas de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera, determinando la disponibilidad efectiva para el cultivo. Este balance fundamenta la planificación de riegos suplementarios y decisiones agronómicas asociadas, integrando precipitación, irrigación, almacenamiento edáfico, evapotranspiración y drenaje profundo en un marco analítico que permite anticipar déficits y optimizar intervenciones correctivas (Martínez-López et al., 2022).

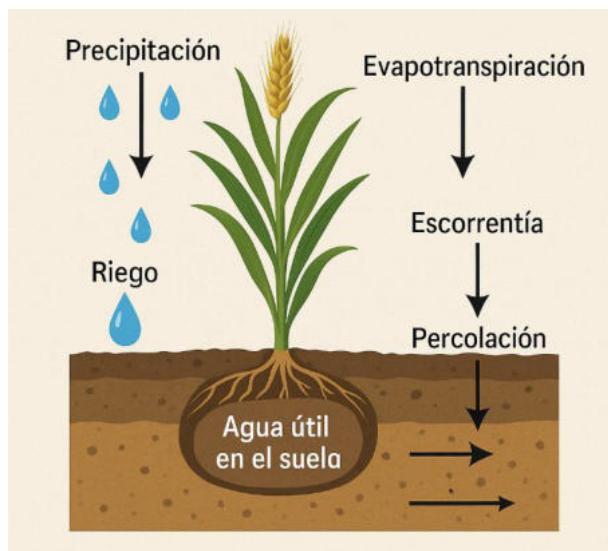


Figura 31. Balance hídrico del cultivo de cebada.

Ecuación del balance hídrico:

$$\Delta S = P + R + C - ET - D - E_s$$

Donde:

- ΔS = Variación del contenido de agua en el suelo
- P = Precipitación efectiva
- R = Riego aplicado
- C = Ascenso capilar
- ET = Evapotranspiración del cultivo
- D = Drenaje profundo
- Es = Escorrentía superficial

8.1.2 *Requerimientos hídricos de la cebada*

La cebada presenta requerimientos hídricos relativamente moderados comparados con otros cereales. Según las investigaciones realizadas en diferentes regiones productoras, el cultivo requiere entre 350-500 mm de agua durante todo su ciclo, dependiendo de las condiciones climáticas y la duración del período vegetativo (UnNisa et al., 2022).

Tabla 6. Valores referenciales de coeficiente de cultivo (Kc) de cebada.

Etapa fenológica	Duración (días)	Kc promedio	Requerimiento de agua (mm)
Siembra – Emergencia	10 – 20	0.30 – 0.40	40 – 60
Macollamiento	20 – 30	0.70 – 0.85	80 – 120

Encañado	– 30 – 40	1.00 – 1.10	120 – 150
Espigamiento			
Llenado de grano	– 30 – 40	0.70 – 0.80	100 – 140
Madurez			

Fuente: Adaptado de FAO (2019); Falconi et al. (2010).

Distribución de los requerimientos hídricos por etapa fenológica:

- **Germinación-emergencia:** 25-35 mm (5-7% del total)
- **Macollamiento:** 60-80 mm (15-18% del total)
- **Encañado:** 90-120 mm (22-25% del total)
- **Espigamiento-floración:** 120-150 mm (30-35% del total)
- **Llenado de grano:** 80-100 mm (20-22% del total)
- **Maduración:** 20-30 mm (5-6% del total)

Tabla 7. Comparación de rendimientos bajo riego y secano en cebada.

Condición de cultivo	Precipitación o lámina aplicada (mm)	Rendimiento promedio (t/ha)	Observaciones
Secano (semiárido)	350 – 500	1.0 – 2.5	Alta variabilidad; depende de lluvias y conservación de humedad.
Secano (templado)	450 – 600	2.5 – 3.5	Mejor estabilidad; depende de fechas de siembra.

Bajo riego tradicional (gravedad)	500 – 650	3.0 – 4.0	Baja eficiencia de uso del agua (40–50 %).
Bajo riego por aspersión	450 – 550	4.0 – 5.5	Mayor uniformidad y eficiencia (70–80 %).
Bajo pivote central	400 – 500	5.5 – 6.5	Alta eficiencia y reducción de pérdidas por evaporación.
Riego localizado (goteo)	350 – 450	6.0 – 7.0	Poco común en cebada, aplicado en zonas áridas y de investigación.

8.1.3 *Coefficiente de Cultivo (Kc)*

El coeficiente de cultivo (K_c) evoluciona dinámicamente durante el ciclo fenológico, reflejando modificaciones en el área foliar fotosintéticamente activa, arquitectura de planta y características fisiológicas que modulan la transpiración:

- **Fase inicial** (15-20 días post-emergencia): $K_c = 0.30-0.40$, período de cobertura reducida y predominio de evaporación desde suelo desnudo.
- **Fase de desarrollo vegetativo** (25-30 días): $K_c = 0.40-0.75$, incremento progresivo asociado a expansión foliar acelerada y macollamiento activo.

- **Fase intermedia o crítica** (40-50 días): $K_c = 1.05-1.20$, máxima demanda correspondiente a cobertura completa del suelo, máxima área foliar y fases reproductivas de alta actividad metabólica.
- **Fase de maduración** (20-25 días): $K_c = 0.25-0.40$, descenso pronunciado por senescencia foliar progresiva y reducción de actividad fisiológica.

8.1.4 Evapotranspiración del cultivo

La evapotranspiración del cultivo (E_{Tc}) se calcula mediante la expresión:

$$E_{Tc} = E_{To} \times K_c$$

Donde E_{To} representa la evapotranspiración de referencia determinada por variables climáticas —radiación solar, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento— según metodologías estandarizadas (Penman-Monteith). Los valores típicos de E_{Tc} para cebada oscilan entre 3-6 mm/día durante etapas de máximo desarrollo vegetativo-reproductivo, variación dependiente de condiciones climáticas locales y características varietales específicas (Mansour et al., 2023).

8.2 Períodos críticos

8.2.1 Identificación de etapas sensibles al déficit hídrico

El cultivo de cebada presenta diferentes niveles de sensibilidad al estrés hídrico según la etapa fenológica. La identificación precisa de estos períodos críticos es esencial para optimizar el uso del agua disponible.

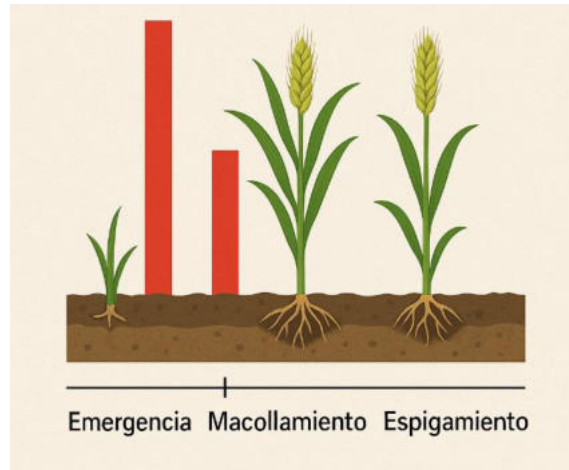


Figura 32. Períodos críticos del cultivo frente al déficit hídrico.

Períodos de máxima sensibilidad:

1. **Germinación y emergencia (0-15 días después de siembra)**
 - El déficit hídrico en esta etapa reduce significativamente la densidad de plantas
 - La humedad del suelo debe mantenerse entre 60-70% de la capacidad de campo
 - Una emergencia deficiente puede reducir el rendimiento hasta en 40%
2. **Inicio del macollamiento (20-35 días después de siembra)**
 - Etapa crucial para la determinación del número de macollos productivos
 - El estrés hídrico reduce el macollamiento en 30-50%

- Afecta directamente el número de espigas por unidad de superficie
3. **Elongación del tallo - Encañado (45-60 días después de siembra)**
- Período de máximo crecimiento vegetativo
 - El déficit hídrico limita la altura de planta y el desarrollo del área foliar
 - Reducción del 20-30% en la biomasa total
4. **Floración y polinización (65-75 días después de siembra)**
- Etapa más crítica para la determinación del rendimiento
 - El estrés hídrico puede causar esterilidad de flores y reducir el número de granos por espiga
 - Pérdidas de rendimiento del 35-50% con déficit severo
5. **Llenado de grano (75-100 días después de siembra)**
- Determina el peso de mil granos
 - El déficit hídrico acelera la senescencia foliar y reduce la duración del llenado
 - Disminución del 15-25% en el peso del grano

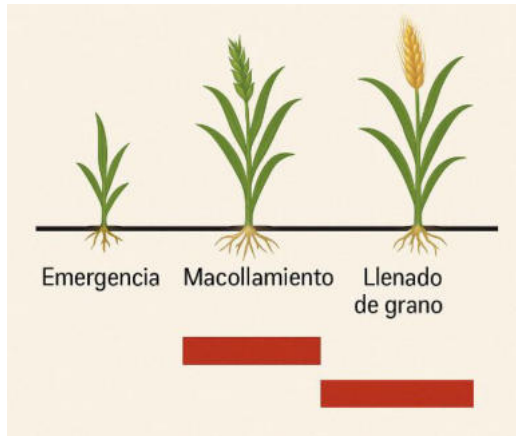


Figura 33. Períodos críticos del cultivo frente al déficit hídrico.

8.2.2 Efectos del estrés hídrico

El estrés hídrico en cebada desencadena una serie de respuestas fisiológicas y morfológicas:

Respuestas fisiológicas:

- Cierre estomático y reducción de la fotosíntesis
- Acumulación de solutos compatibles (prolina, azúcares)
- Alteración del balance hormonal (aumento de ABA)
- Reducción de la actividad enzimática

Respuestas morfológicas:

- Reducción del área foliar
- Mayor desarrollo radicular en profundidad

- Aceleración de la senescencia
- Reducción del número y tamaño de órganos reproductivos

8.3 Sistemas de riego

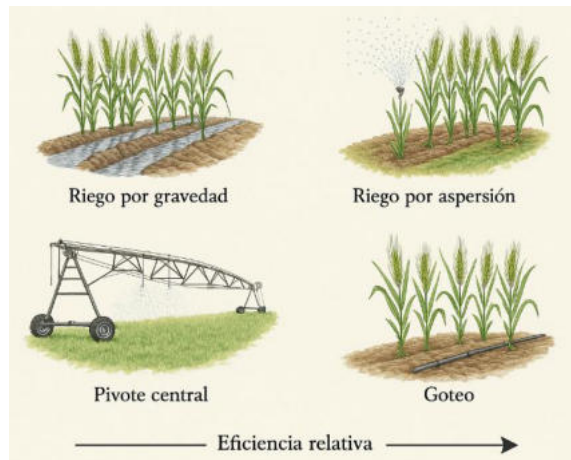


Figura 34. Sistemas de riego.

8.3.1 Riego por superficie

El riego por superficie, aunque tradicional, sigue siendo ampliamente utilizado en el cultivo de cebada, especialmente en regiones con topografía favorable y disponibilidad de agua.

Riego por surcos:

- Eficiencia de aplicación: 50-70%
- Espaciamiento entre surcos: 0.70-0.90 m
- Pendiente óptima: 0.2-0.5%

- Longitud máxima de surco: 100-150 m en suelos pesados, 60-80 m en suelos ligeros

Riego por melgas:

- Eficiencia de aplicación: 60-75%
- Ancho de melga: 3-6 m
- Caudal unitario: 2-4 L/s por metro de ancho
- Pendiente longitudinal: 0.1-0.3%

8.3.2 Riego por aspersión

El riego por aspersión ofrece mayor flexibilidad y eficiencia en el uso del agua, siendo especialmente adecuado para terrenos irregulares.

Sistemas fijos:

- Eficiencia de aplicación: 75-85%
- Marco de aspersores: 12×12 m a 18×18 m
- Presión de trabajo: 2.5-4.0 bar
- Intensidad de aplicación: 6-12 mm/h

Pivote central:

- Eficiencia de aplicación: 80-90%
- Velocidad de avance ajustable según ETc

- Uniformidad de distribución > 85%
- Adaptable a aplicación de fertilizantes

8.3.3 *Riego por goteo*

Aunque menos común en cebada por razones económicas, el riego por goteo subsuperficial está ganando interés en sistemas intensivos.

Características del sistema:

- Eficiencia de aplicación: 90-95%
- Espaciamiento entre líneas: 0.35-0.50 m
- Profundidad de instalación: 15-20 cm
- Caudal de goteros: 1.0-2.0 L/h

8.3.4 *Selección del sistema de riego*

La elección del sistema depende de múltiples factores:

Factores técnicos:

- Topografía del terreno
- Tipo y profundidad del suelo
- Calidad del agua disponible
- Condiciones climáticas (viento, temperatura)

Factores económicos:

- Costo de inversión inicial
- Costos operativos y de mantenimiento
- Precio del agua y energía
- Valor de la producción esperada

8.4 Programación del riego

8.4.1 Métodos de programación

a) Método del balance hídrico:

Este método calcula las necesidades de riego mediante el seguimiento continuo del contenido de agua en el suelo:

$$\text{Dosis de riego} = (\text{CC} - \text{PMP}) \times \text{Da} \times \text{P} \times \text{f}$$

Donde:

- CC = Capacidad de campo (%)
- PMP = Punto de marchitez permanente (%)
- Da = Densidad aparente del suelo (g/cm^3)
- P = Profundidad radicular efectiva (m)
- f = Fracción de agotamiento permisible (0.5-0.6 para cebada)

b) *Método basado en la evapotranspiración:*

$$\text{Lámina neta} = \text{ETc acumulada} \times \text{Kr}$$

Donde Kr es el coeficiente de reducción por estrés (0.85-0.90 para cebada).

8.4.2 *Criterios de riego*

Umbral de riego según etapa fenológica:

- **Establecimiento:** 60% del agua útil disponible
- **Macollamiento:** 55% del agua útil disponible
- **Encañado:** 50% del agua útil disponible
- **Floración:** 45% del agua útil disponible
- **Llenado de grano:** 55% del agua útil disponible
- **Maduración:** Sin riego (promover el secado)

Figura 35. Eficiencia en el uso del agua (EUA) en sistemas de riego.

Sistema de riego	Eficiencia de aplicación (%)	EUA (kg de grano/mm de agua)	Comentario
Gravedad	40 – 50	6 – 8	Pérdidas altas por infiltración profunda y escorrentía.
Aspersión	70 – 80	8 – 10	Adecuado para medianos productores.

Pivote central	80 – 85	9 – 11	Eficiente y tecnificado, pero alto costo inicial.
Goteo	90 – 95	10 – 12	Máxima eficiencia, pero poco viable a gran escala.

8.4.3 Frecuencia y dosis de riego

La frecuencia de riego varía según el sistema utilizado y las condiciones edafoclimáticas:

Riego por superficie:

- Intervalo: 12-18 días
- Dosis: 60-80 mm por aplicación

Riego por aspersión:

- Intervalo: 7-10 días
- Dosis: 25-35 mm por aplicación

Riego por goteo:

- Intervalo: 1-3 días
- Dosis: 5-10 mm por aplicación

8.4.4 Herramientas de monitoreo

a) *Sensores de humedad del suelo:*

- Tensiómetros: Rango útil 0-80 cb
- Sondas de capacitancia (FDR)
- Bloques de yeso: Económicos pero menos precisos
- TDR (Reflectometría de dominio temporal)

b) Indicadores en planta:

- Potencial hídrico foliar: -0.8 a -1.2 MPa (umbral de riego)
- Temperatura del dosel vegetal
- Conductancia estomática

8.5 Eficiencia en el uso del agua

8.5.1 Indicadores de eficiencia

Eficiencia de Uso del Agua (EUA):

$EUA = \text{Rendimiento de grano (kg/ha)} / \text{Agua total aplicada (mm)}$

Valores típicos para cebada: 8-15 kg/ha por mm

Productividad del Agua (PA):

$PA = \text{Rendimiento económico (\$)} / \text{Volumen de agua usado (m}^3\text{)}$

8.5.2 Estrategias para mejorar la eficiencia

a) Prácticas agronómicas:

1. **Selección varietal:**

- Uso de variedades con mayor eficiencia en el uso del agua
- Variedades de ciclo corto en zonas con limitaciones hídricas
- Materiales con sistema radicular profundo

2. **Manejo del suelo:**

- Labranza conservacionista para mejorar la infiltración
- Incorporación de materia orgánica (>2% MO)
- Uso de mulch o coberturas para reducir la evaporación

3. **Densidad de siembra optimizada:**

- Ajuste según disponibilidad hídrica
- 280-350 plantas/m² en riego
- 200-250 plantas/m² en secano

4. **Fertilización balanceada:**

- Relación N:P:K ajustada a la disponibilidad hídrica
- Aplicación fraccionada de nitrógeno
- Uso de inhibidores de la nitrificación

8.5.3 Riego deficitario controlado

El riego deficitario controlado (RDC) es una estrategia que aplica estrés hídrico moderado en etapas menos sensibles (Bello et al., 2022):

a) Estrategia de aplicación:

- 100% ETc durante germinación y establecimiento
- 70-80% ETc durante macollamiento tardío
- 100% ETc durante encañado y floración
- 60-70% ETc durante maduración

b) Beneficios del RDC:

- Ahorro de agua del 20-30%
- Reducción del encamado
- Mejora de la calidad maltera (menor contenido proteico)
- Reducción de pérdidas del 5-10% en rendimiento

8.6 Manejo en condiciones de secano

8.6.1 Caracterización de sistemas de secano

Los sistemas de secano para cebada se clasifican según la precipitación anual:

a) *Secano favorable:*

- Precipitación: 450-600 mm
- Rendimientos esperados: 3.5-5.0 t/ha
- Riesgo de déficit hídrico: Bajo-Moderado

b) *Secano medio:*

- Precipitación: 350-450 mm
- Rendimientos esperados: 2.0-3.5 t/ha
- Riesgo de déficit hídrico: Moderado-Alto

c) *Secano marginal:*

- Precipitación: 250-350 mm
- Rendimientos esperados: 1.0-2.0 t/ha
- Riesgo de déficit hídrico: Alto-Muy Alto

8.6.2 *Técnicas de conservación de humedad*

a) *Captación de agua de lluvia:*

1. **Microcaptación:**

- Surcos en contorno
- Camellones alternos

- Microcuencas de captación

2. **Barbecho:**

- Barbecho limpio: Acumulación de 30-40% de la precipitación
- Barbecho químico: Uso de herbicidas para control de malezas
- Duración óptima: 6-8 meses antes de la siembra

Manejo de rastrojos:

- Mantener 30-50% de cobertura del suelo
- Altura de corte: 15-20 cm
- Orientación perpendicular a vientos dominantes

8.6.3 *Ajustes en el manejo agronómico*

Fecha de siembra:

- Siembra temprana para aprovechar lluvias invernales
- Siembra al inicio del período lluvioso
- Evitar siembras tardías que coincidan floración con déficit hídrico

Densidad de población:

- Reducción del 30-40% respecto a condiciones de riego
- 180-220 plantas/m² en secano medio

- 150-180 plantas/m² en secano marginal

Fertilización ajustada:

- Dosis de N: 40-60 kg/ha (50% del riego)
- Mayor énfasis en fósforo para desarrollo radicular
- Aplicación localizada para mayor eficiencia

8.6.4 Variedades para secano

Características deseables:

- Ciclo corto a intermedio (90-120 días)
- Sistema radicular profundo y denso
- Alta capacidad de macollamiento
- Tolerancia al estrés hídrico
- Eficiencia en el uso del agua $> 12 \text{ kg/ha} \cdot \text{mm}$

8.6.5 Análisis de riesgo y toma de decisiones

Índices de sequía:

- Índice de Precipitación Estandarizada (SPI)
- Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI)
- Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI)

Estrategias de gestión del riesgo:

- Diversificación de fechas de siembra
- Seguro agrícola contra sequía
- Rotación con cultivos más tolerantes
- Sistemas mixtos agricultura-ganadería

8.7 Conclusiones del capítulo

El manejo eficiente del agua en el cultivo de cebada requiere un enfoque integral que considere las características del cultivo, las condiciones edafoclimáticas locales y los recursos disponibles. Los puntos clave para optimizar el uso del agua incluyen:

1. **Conocimiento preciso del balance hídrico** del cultivo y sus requerimientos en cada etapa fenológica, permitiendo una planificación adecuada del riego.
2. **Identificación y protección de los períodos críticos**, especialmente durante la floración y el llenado de grano, donde el déficit hídrico tiene mayor impacto en el rendimiento.
3. **Selección apropiada del sistema de riego** basada en criterios técnicos y económicos, considerando la eficiencia de aplicación y los costos asociados.

4. **Programación científica del riego** mediante el uso de herramientas de monitoreo y criterios objetivos que optimicen la aplicación del agua.
5. **Implementación de estrategias para mejorar la eficiencia** en el uso del agua, incluyendo el riego deficitario controlado y prácticas agronómicas complementarias.
6. La adaptación del manejo bajo condiciones de secano mediante técnicas de conservación de humedad edáfica labranza reducida, coberturas de rastrojos, control oportuno de malezas competidoras y ajustes agronómicos estratégicos selección de fechas de siembra, densidades poblacionales reducidas, variedades de ciclo apropiado maximiza el aprovechamiento del agua disponible proveniente exclusivamente de precipitaciones.

La integración de estos componentes técnicos con variedades mejoradas dotadas de características de eficiencia hídrica sistemas radicales profundos, ajuste osmótico, *stay-green* y tecnologías modernas de monitoreo sensores de humedad edáfica, imágenes satelitales, estaciones meteorológicas automatizadas posibilita alcanzar producción sostenible de cebada mediante uso racional del recurso hídrico, objetivo fundamental en escenarios actuales caracterizados por cambio climático progresivo, variabilidad pluviométrica acentuada y escasez hídrica creciente que amenaza la viabilidad de sistemas agrícolas tradicionales dependientes de dotaciones hídricas actualmente insostenibles.

CAPÍTULO IX

9 MANEJO DE MALEZAS EN EL CULTIVO DE CEBADA

Las malezas representan uno de los principales factores de competencia en el cultivo de cebada, ya que reducen la disponibilidad de luz, agua y nutrientes, y dificultan procesos como la cosecha. Este capítulo examina la biología de las principales especies arvenses, sus ciclos de vida y las condiciones que favorecen su proliferación. Se analizan los métodos de control cultural, mecánico, químico y biológico, destacando la importancia del manejo integrado de malezas (MIM) para minimizar pérdidas sin comprometer la sostenibilidad del sistema agrícola. Además, se aborda el uso racional de herbicidas según momentos fenológicos, niveles de infestación y características del suelo, así como el riesgo de generar resistencias por aplicaciones repetitivas de los mismos principios activos. Este apartado proporciona criterios técnicos para implementar programas de control eficientes y ambientalmente seguros.

El manejo de malezas constituye componente crítico en la producción eficiente de *H. vulgare*, representando factor determinante del rendimiento alcanzable y atributos de calidad del grano. Las especies adventicias compiten directamente con el cultivo por recursos limitados —agua, nutrientes minerales, radiación fotosintéticamente activa, espacio físico— generando pérdidas productivas entre 20-80% cuando no se implementan estrategias de control apropiadas. Este capítulo examina integralmente las opciones técnicas para manejo efectivo de malezas, priorizando sostenibilidad ambiental, eficiencia económica y viabilidad operativa en distintos contextos productivos.

9.1 Principales malezas en cebada

9.1.1 Clasificación de malezas

Las malezas que afectan al cultivo de cebada pueden clasificarse según diversos criterios que facilitan su identificación y manejo (Naeem et al., 2022):

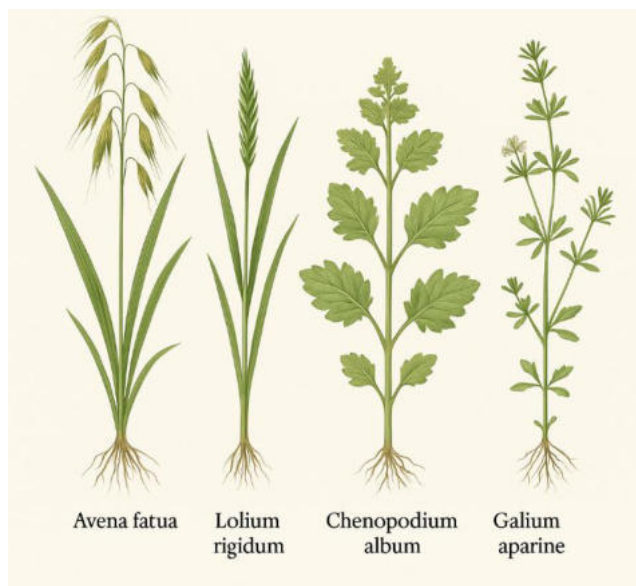


Figura 36. Principales malezas en cebada.

a) *Por su ciclo de vida:*

- **Anuales:** Completan su ciclo en una temporada de cultivo. Incluyen especies de verano (germinación primaveral) e invierno (germinación otoñal).
- **Bianuales:** Requieren dos años para completar su ciclo vital.

- **Perennes:** Persisten más de dos años, regenerándose mediante estructuras vegetativas especializadas.

b) *Por su morfología:*

- **Hoja ancha (dicotiledóneas):** Caracterizadas por hojas con nervadura reticulada y cotiledones visibles en la germinación.
- **Hoja angosta (monocotiledóneas):** Presentan hojas con nervaduras paralelas y un solo cotiledón como característica.

9.1.2 *Especies problemáticas comunes*

En los sistemas de producción de cebada de la región andina, particularmente en zonas como las provincias de Bolívar, Chimborazo e Imbabura, las especies más problemáticas incluyen:

Malezas de hoja ancha:

- *Brassica rapa* (nabo silvestre)
- *Raphanus raphanistrum* (rábano silvestre)
- *Chenopodium album* (quinua silvestre)
- *Amaranthus spp.* (bledo)
- *Polygonum spp.* (lengua de vaca)
- *Rumex crispus* (lengua de vaca)

Malezas de hoja angosta:

- *Avena fatua* (avena loca)
- *Lolium multiflorum* (raigrás)
- *Phalaris minor* (alpiste silvestre)
- *Setaria spp.* (cola de zorro)

9.1.3 Biología y ecología de las malezas

El conocimiento de las características biológicas y ecológicas de las malezas es fundamental para desarrollar estrategias de manejo efectivas. Aspectos clave incluyen (Chaudhary et al., 2022):

- **Dormancia de semillas:** Mecanismo de supervivencia que permite la germinación escalonada.
- **Banco de semillas del suelo:** Reservorio de propágulos que puede contener entre 1,000 y 100,000 semillas/m².
- **Capacidad reproductiva:** Algunas especies pueden producir más de 50,000 semillas por planta.
- **Adaptabilidad:** Plasticidad fenotípica que permite que esta planta se adapte a diferentes ambientes.

9.2 Períodos críticos de competencia

9.2.1 Concepto y determinación

El período crítico de competencia (PCC) define la ventana temporal durante la cual el cultivo debe mantenerse libre de interferencia por malezas para prevenir reducciones irreversibles del rendimiento. En cebada, este período se extiende típicamente desde el inicio del macollamiento hasta el comienzo del encañado, abarcando aproximadamente desde el día 20 hasta el 60 post-emergencia, fase durante la cual se definen componentes críticos del rendimiento número de tallos fértiles, diferenciación de espiguillas particularmente vulnerables a competencia interespecífica por recursos.

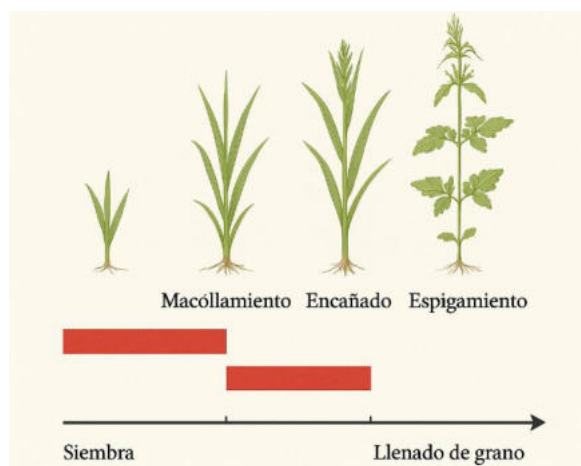


Figura 37. Períodos críticos de competencia.

9.2.2 Factores que afectan el PCC

Factores del cultivo:

- Densidad de siembra: Mayor densidad reduce el período crítico

- Vigor inicial: Variedades con emergencia rápida compiten mejor
- Arquitectura de planta: Cultivares con mayor cobertura foliar suprimen malezas más efectivamente

Factores de las malezas:

- Densidad poblacional
- Especies presentes y su agresividad
- Momento de emergencia relativo al cultivo

Factores ambientales:

- Disponibilidad de agua y nutrientes
- Temperatura y radiación solar
- Tipo y fertilidad del suelo

9.2.3 Umbral económico de daño

El umbral económico representa la densidad de malezas a partir de la cual el costo del control se justifica por el incremento en el rendimiento. Para cebada, este umbral varía según:

- Precio del grano
- Costo del control
- Potencial de rendimiento del lote

- Especies de malezas presentes

9.3 Control preventivo y cultural

9.3.1 Medidas preventivas

La prevención constituye la primera línea de defensa en el manejo integrado de malezas (Fazil et al., 2022):

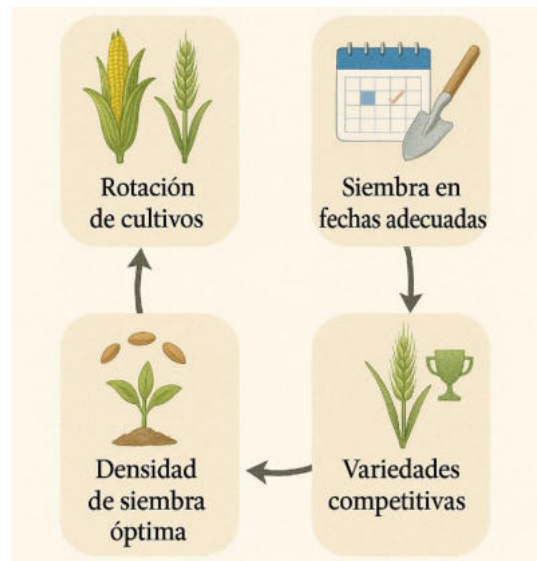


Figura 38. Control preventivo y cultural.

Uso de semilla certificada: Garantiza material libre de semillas de malezas y con alto poder germinativo, como se evidenció en los estudios realizados en Laguacoto donde se utilizó semilla registrada de las variedades Cañicapa y Voyager con densidades de 120-135 kg/ha.

Limpieza de maquinaria: Evita la dispersión de propágulos entre lotes.

Manejo de bordes y caminos: Control de malezas en áreas no cultivadas que actúan como reservorios.

Cuarentena vegetal: Prevención de la introducción de nuevas especies problemáticas.

9.3.2 Prácticas culturales

Preparación del suelo: Una adecuada preparación, como la descrita en los estudios (arada y rastra), reduce significativamente la presión inicial de malezas. El laboreo debe realizarse 2-3 meses antes de la siembra para permitir la descomposición de residuos vegetales (Metiku & Muluken, 2024).

Densidad y disposición espacial: Densidades apropiadas según el método de siembra 110-180 kg/ha para siembra mecanizada en hileras, hasta 200 kg/ha para siembra manual al voleo facilitan cobertura rápida del suelo que reduce la radiación disponible para germinación de malezas fotoblásticas. La siembra en hileras espaciadas uniformemente permite implementar control mecánico posterior mediante cultivadoras que remueven malezas en entresurcos sin dañar el cultivo establecido.

Rotación de cultivos: Interrumpe los ciclos biológicos de especies adventicias mediante alternancia de cultivos con fenologías, arquitecturas y requerimientos de manejo contrastantes que previenen la especialización del banco de semillas edáfico hacia especies particularmente competitivas. Rotaciones típicas en sistemas andinos incluyen secuencias como cebada-papa-quinua o cebada-leguminosas forrajeras-tubérculos, donde la diversidad de prácticas agronómicas fechas de siembra, tipos de laboreo,

herbicidas con modos de acción diferentes reduce la presión selectiva hacia biotipos resistentes.

Fertilización estratégica: La aplicación localizada de fertilizantes bandas laterales a la línea de siembra, aplicaciones foliares durante macollamiento favorece al cultivo sobre malezas mediante acceso preferencial a nutrientes. Estudios demuestran efectividad de fertilización nitrogenada complementaria con urea (150 kg/ha) fraccionada al macollamiento, momento en que el sistema radical del cultivo se encuentra establecido mientras muchas malezas aún están en fases iniciales, confiriendo ventaja competitiva temporal que se traduce en mayor capacidad de macollamiento y supresión del dosel vegetal del cultivo sobre especies adventicias.

9.4 Control mecánico

9.4.1 Métodos de control mecánico



Figura 39. Control mecánico.

Control manual:

- Deshierbe selectivo: Eliminación manual de malezas grandes entre 45-60 días después de la siembra

- Ventajas: Alta selectividad, no requiere inversión en equipos
- Desventajas: Alto requerimiento de mano de obra, limitado a superficies pequeñas

Control con herramientas:

- Azadón o lampa: Efectivo para malezas establecidas
- Cultivadora manual: Permite trabajo entre hileras
- Rendimiento: 0.05-0.1 ha/jornal según condiciones

Control mecanizado:

- Cultivadoras de tiro animal o tractor
- Rastras de púas flexibles para control temprano
- Eficiencia: 2-4 ha/día con implementos adecuados

9.4.2 *Momento óptimo de intervención*

El control mecánico es más efectivo cuando:

- Las malezas tienen 2-4 hojas verdaderas
- El suelo presenta humedad adecuada (capacidad de campo)
- El cultivo ha desarrollado anclaje suficiente (post-macollamiento)
- Las condiciones climáticas favorecen el secado de malezas eliminadas

9.5 Control químico: Herbicidas selectivos

9.5.1 Principios del control químico

El control químico debe considerarse como una herramienta dentro del manejo integrado, no como la única solución. Los estudios documentados reportan el uso exitoso de herbicidas selectivos en cebada (Galon et al., 2023).



Figura 40. Control químico: herbicidas selectivos.

9.5.2 Herbicidas recomendados

a) *Para malezas de hoja ancha:*

Metsulfuron-metil:

- Dosis: 6-8 g/ha (evidenciado en los estudios con aplicaciones de 6.5 g/ha)

- Momento: 30-40 días después de siembra, al inicio del macollamiento
- Modo de acción: Inhibidor de la enzima ALS (acetolactato sintasa)
- Espectro: Excelente control de dicotiledóneas anuales y algunas perennes
- Período de carencia: 45-60 días antes de cosecha

2,4-D Amina:

- Dosis: 0.75-1.0 L/ha
- Momento: Macollamiento a inicio de encañado
- Restricciones: Evitar aplicación después del encañado para prevenir malformaciones en espiga

Dicamba:

- Dosis: 150-200 mL/ha
- Uso: En mezcla con otros herbicidas para ampliar espectro
- Precaución: Alta volatilidad, riesgo de deriva

b) Para malezas gramíneas:

Pinoxaden:

- Dosis: 0.8-1.0 L/ha

- Control específico de gramíneas anuales
- Aplicación temprana para mayor efectividad

Clodinafop-propargil:

- Dosis: 60-80 g/ha
- Excelente para avena loca y raigrás
- Aplicar con malezas en 2-4 hojas

9.5.3 Tecnología de aplicación

Calibración del equipo:

- Volumen de aplicación: 150-200 L/ha
- Presión: 30-40 PSI
- Tipo de boquilla: Abanico plano para herbicidas de contacto
- Velocidad de aplicación: 4-6 km/h

Condiciones óptimas:

- Temperatura: 15-25°C
- Humedad relativa: >60%
- Viento: <10 km/h
- Evitar aplicación con rocío o lluvia inminente

Uso de coadyuvantes:

- Surfactantes no iónicos: Mejoran penetración
- Aceites minerales o vegetales: Aumentan eficacia en condiciones adversas
- Dosis: 0.1-0.25% v/v según producto

9.6 Manejo Integrado de Malezas (MIM)

9.6.1 Concepto y principios

El Manejo Integrado de Malezas representa un enfoque holístico que combina múltiples tácticas de control para mantener las poblaciones de malezas por debajo del umbral económico de daño, minimizando el impacto ambiental y reduciendo el riesgo de desarrollo de resistencia (McCollough & Melander, 2022).



Figura 41. Manejo integrado de malezas (MIM).

9.6.2 Componentes del MIM en Cebada

Monitoreo y mapeo:

- Identificación de especies presentes
- Evaluación de densidades poblacionales
- Registro histórico de infestaciones
- Uso de tecnologías GPS para mapeo preciso

Integración de métodos:

1. Fase pre-siembra:

- Preparación anticipada del terreno
- Control de malezas emergidas (barbecho químico o mecánico)
- Selección de lotes con menor banco de semillas

2. Fase de siembra:

- Uso de semilla certificada de alta calidad
- Densidad óptima según condiciones
- Fertilización localizada

3. Fase vegetativa:

- Control químico selectivo según evaluación

- Control mecánico complementario
- Mantenimiento de bordes y caminos

4. Fase reproductiva a cosecha:

- Prevención de producción de semillas
- Cosecha oportuna para reducir desgrane de malezas
- Manejo de rastrojos

9.6.3 Manejo de la resistencia a herbicidas

Estrategias preventivas:

- Rotación de modos de acción herbicida
- Uso de mezclas con diferentes sitios de acción
- Aplicación de dosis recomendadas (evitar subdosis)
- Integración con métodos no químicos

Detección y manejo de resistencia:

- Monitoreo de fallas de control
- Confirmación mediante bioensayos
- Implementación de planes de contingencia
- Registro y comunicación de casos

9.6.4 Evaluación económica del MIM

El análisis beneficio/costo del control de malezas debe considerar:

Costos directos:

- Herbicidas: \$20-40/ha según productos
- Aplicación: \$10-20/ha (evidenciado en estudios con costos de aplicación de \$20/ha)
- Control mecánico: \$30-50/ha
- Mano de obra: Variable según región

Beneficios:

- Incremento de rendimiento: 20-60% según nivel de infestación
- Mejora en calidad del grano
- Facilidad de cosecha
- Reducción del banco de semillas a largo plazo

Los estudios en Laguacoto demostraron que el manejo adecuado de malezas, combinado con fertilización apropiada, permitió alcanzar rendimientos superiores a 3,500 kg/ha, con relaciones beneficio/costo favorables (Górski et al., 2024).

9.6.5 Sostenibilidad del sistema

El MIM en cebada debe orientarse hacia:

- Reducción gradual de la dependencia de herbicidas
- Conservación de la biodiversidad funcional
- Mantenimiento de la rentabilidad del sistema
- Adaptación al cambio climático
- Cumplimiento de normativas ambientales

9.7 Conclusiones del capítulo

El manejo exitoso de malezas demanda enfoque integrado que articule conocimiento de la biología de especies problemáticas, comprensión de interacciones competitivas cultivo-malezas, y aplicación estratégica de tácticas complementarias de control. La evidencia experimental de localidades productoras como Laguacoto documenta que la combinación sinérgica de prácticas culturales apropiadas densidades optimizadas, rotaciones, fertilización estratégica, uso racional de herbicidas selectivos como metsulfuron-metil aplicados en momentos fisiológicos precisos, y control mecánico complementario, permite mantener el cultivo libre de interferencia durante el período crítico de competencia, asegurando expresión del potencial productivo y sostenibilidad del sistema.

La implementación del Manejo Integrado de Malezas (MIM) trasciende mejoras en productividad inmediata, contribuyendo a sostenibilidad de largo plazo del agroecosistema mediante preservación de diversidad funcional, reducción de riesgos de evolución de resistencia a herbicidas por presión selectiva unidireccional, y minimización del impacto ambiental asociado a aplicaciones químicas repetidas e intensivas. El éxito

del MIM depende fundamentalmente de capacitación continua de productores en identificación temprana de especies adventicias y umbrales de intervención, monitoreo sistemático de poblaciones de malezas mediante parcelas centinela, y adaptación flexible de estrategias según condiciones específicas presión de malezas, clima, recursos disponibles de cada sistema productivo, reconociendo que no existen recetas universales aplicables mecánicamente en contextos heterogéneos.

CAPÍTULO X

10 PLAGAS DEL CULTIVO

El cultivo de cebada, como todo sistema agrícola, está expuesto al ataque de diversas plagas que afectan su desarrollo vegetativo, la integridad de los tejidos fotosintéticos y la calidad del grano. Este capítulo examina los principales insectos y organismos nocivos que intervienen en las etapas críticas del cultivo, como gusanos del suelo, pulgones, trips y larvas defoliadoras. Se describen sus ciclos biológicos, mecanismos de daño y condiciones ambientales que favorecen su proliferación.

El enfoque central se basa en el manejo integrado de plagas (MIP), que combina monitoreo, control biológico, prácticas culturales, uso de variedades tolerantes y aplicación racional de insecticidas. Se enfatiza que la toma de decisiones no debe depender exclusivamente del control químico, sino de umbrales económicos de daño, clasificación de estados fenológicos y predicción de riesgos mediante herramientas tecnológicas.

Las plagas constituyen factores bióticos limitantes críticos en la producción de *H. vulgare*, generando pérdidas sustanciales en rendimiento y calidad del grano cuando no se implementan estrategias de manejo apropiadas. El conocimiento de la biología, ecología y dinámica poblacional de organismos plaga resulta fundamental para diseñar programas de control eficientes que maximicen productividad mientras minimizan impactos ambientales adversos asociados a aplicaciones indiscriminadas de insecticidas de amplio espectro.

10.1 Plagas del suelo

10.1.1 Gusano alambre (*Agriotes spp.*)

Los gusanos alambre, estados larvales de coleópteros de la familia Elateridae, representan las plagas subterráneas de mayor relevancia económica en el cultivo. Estas larvas, morfológicamente caracterizadas por cuerpo alargado, cilíndrico y de consistencia esclerotizada dura, alcanzan longitudes hasta 25 mm y exhiben coloración amarillenta a pardo-brillante. Habitan en el perfil edáfico donde se alimentan de semillas en germinación, raíces jóvenes y la base del tallo, generando daños que reducen el establecimiento poblacional, comprometen el anclaje de plantas y facilitan la entrada de patógenos oportunistas que agravan las pérdidas (Vega-Domínguez et al., 2024).



Figura 42. Plagas del suelo en cebada.

Biología y ciclo de vida: El ciclo completo puede durar entre 3-5 años, permaneciendo la mayor parte como larva en el suelo. Los adultos emergen en primavera y depositan sus huevos en el suelo húmedo, preferentemente en áreas con cobertura vegetal. Las larvas pasan por múltiples estadios, alimentándose de materia orgánica y raíces durante varios años antes de pupar (Ccente et al., 2021).

Daños característicos: Las larvas causan daños significativos al sistema radicular y órganos subterráneos, ingresando al interior de las semillas y alimentándose de su contenido. Los síntomas incluyen:

- Pequeños orificios en las semillas germinadas
- Plantas marchitas o muertas en rodales
- Reducción del stand de plantas
- Debilitamiento general del cultivo

Condiciones favorables: Los suelos húmedos, con alto contenido de materia orgánica y pH ligeramente ácido favorecen su desarrollo. Las rotaciones con pasturas o praderas incrementan significativamente las poblaciones.

10.1.2 Nematodos fitoparásitos (Heterodera avenae)

El nematodo del quiste constituye plaga microscópica especializada en gramíneas que ocasiona pérdidas significativas, particularmente en condiciones de déficit hídrico que intensifican los daños al comprometer simultáneamente la capacidad de absorción radical.

Sintomatología: Los síntomas se expresan como rodales irregulares circulares o elípticos dentro del cultivo donde las plantas exhiben enanismo pronunciado, clorosis generalizada por interferencia con absorción de nutrientes, sistema radical severamente reducido con proliferación anormal de raíces secundarias que intentan compensar la funcionalidad perdida, espigas pequeñas malformadas con bajo número de granos, y maduración prematura inducida por estrés fisiológico.

Ciclo biológico: Los huevos permanecen protegidos dentro de quistes cuerpos de hembras muertas esclerotizados en el suelo, manteniendo viabilidad durante varios años hasta que estímulos químicos radiculares del hospedante desencadenan la eclosión. Las larvas infectivas de segundo estadio (J2) penetran raíces jóvenes mediante estilete bucal, migrando hacia el cilindro vascular donde se establecen como endoparásitos sedentarios, induciendo células nodrizas modificadas (sincitios) desde las cuales se alimentan y completan su desarrollo hasta adultos.

10.1.3 Gusanos blancos (*Phyllophaga spp.*)

Las larvas de estos escarabajos, denominadas coloquialmente "gallinas ciegas" o "gusanos blancos", constituyen plaga importante particularmente en sistemas con rotación previa de pasturas donde las poblaciones se acumulan.

Identificación y daños: Las larvas exhiben morfología característica en forma de "C", coloración blanco-cremosa, cabeza esclerotizada pardo-rojiza, y tres pares de patas torácicas. Se alimentan vorazmente de raíces mediante mandíbulas poderosas, provocando amarillamiento progresivo del follaje por interferencia con absorción hídrica y nutricional, plantas que

se desprenden fácilmente al ser traccionadas por pérdida de anclaje radical, reducción severa del macollamiento por daño a la corona de la planta, y pérdidas distribuidas en rodales irregulares que reflejan la agregación espacial característica de las poblaciones larvales en el suelo.

10.2 Plagas del follaje

10.2.1 Pulgones o áfidos

Los pulgones representan una de las plagas foliares más importantes, no solo por el daño directo sino también por su capacidad de transmitir virus.



Figura 43. Plagas del follaje.

Especies principales:

- *Rhopalosiphum padi* (pulgón de la avena)
- *Sitobion avenae* (pulgón del grano)

- *Schizaphis graminum* (pulgón verde)

Biología: Estos insectos hemípteros presentan reproducción partenogenética durante la mayor parte del ciclo, permitiendo un crecimiento explosivo de las poblaciones bajo condiciones favorables (15-25°C y humedad relativa del 60-80%).

Daños directos e indirectos:

Directos: Succión de savia causando clorosis, deformación de hojas, reducción del área fotosintética

Indirectos: Transmisión del virus del enanismo amarillo (BYDV), producción de melaza que favorece el desarrollo de fumagina

Dinámica poblacional: Las poblaciones aumentan rápidamente en primavera, alcanzando picos durante el encañado y espigamiento. Los enemigos naturales juegan un papel crucial en la regulación poblacional.

10.2.2 Trips (*Thrips spp.*)

Pequeños insectos de 1-2 mm que raspan y succionan el contenido celular de las hojas.

Síntomas característicos:

- Estrías plateadas en las hojas
- Decoloración y enrollamiento foliar
- Reducción del crecimiento en ataques severos
- Transmisión de virus en algunas especies

10.2.3 Chinchas (Nezara viridula, Dichelops furcatus)

Aunque más comunes en estadios reproductivos, pueden afectar el follaje en altas densidades poblacionales.

Impacto en el cultivo:

- Puntuaciones necróticas en hojas
- Transmisión de patógenos
- Debilitamiento general de la planta

10.3 Plagas de la espiga y grano

10.3.1 Complejo de chinchas

Durante la fase reproductiva, diversas especies de chinchas pueden causar daños significativos:



Figura 44. Plagas de la espiga y grano.

Especies importantes:

- *Eurygaster integriceps* (chinche del grano)
- *Aelia* spp.
- *Nysius* spp.

Daños en espiga y grano:

- Granos vanos o chupados
- Reducción del peso hectolítrico
- Deterioro de la calidad panadera por enzimas proteolíticas
- Manchado del grano

10.3.2 Gorgojos de almacén

Aunque principalmente son plagas de postcosecha, pueden iniciar su infestación en campo:

Especies principales:

- *Sitophilus granarius* (gorgojo del trigo)
- *Rhyzopertha dominica* (barrenador menor)

Prevención en campo:

- Cosecha oportuna
- Eliminación de granos voluntarios
- Limpieza de equipos de cosecha

10.4 Monitoreo y umbrales de daño

10.4.1 Técnicas de monitoreo

El monitoreo sistemático constituye la base fundamental para la toma de decisiones en el manejo de plagas (Juvale & Baum, 2018):



Figura 45. Monitoreo y umbrales de daño.

Muestreo de plagas del suelo:

- Calicatas de 30x30x30 cm para conteo de larvas
- Trampas cebo para gusanos alambre
- Análisis nematológico de muestras de suelo y raíces
- Frecuencia: presembrado y emergencia

Muestreo de plagas foliares:

- Red entomológica: 10 redadas por sitio en zigzag
- Observación directa: 10 plantas al azar por sitio
- Trampas amarillas adhesivas para áfidos alados
- Frecuencia: semanal desde emergencia hasta grano pastoso

Muestreo de plagas de espiga:

- Golpeo de espigas sobre bandeja blanca
- Observación directa de 20 espigas por sitio
- Frecuencia: desde espigamiento hasta cosecha

10.4.2 Umbrales de daño económico

Los umbrales varían según el estado fenológico, condiciones ambientales y potencial de rendimiento:

Umbrales orientativos:

Gusano alambre: 2-3 larvas/m² en presiembra

Pulgones:

- Emergencia-macollamiento: 5-10 áfidos/planta
- Encañado-espigamiento: 10-15 áfidos/planta
- Floración-llenado: 20-30 áfidos/espiga

Chinches:

- Grano lechoso: 1-2 chinches/m²

- Grano pastoso: 2-3 chinches/m²

Trips: 10-15 individuos/planta en hoja bandera

10.5 Control biológico

10.5.1 Enemigos naturales

La conservación y potenciación de enemigos naturales constituye un pilar fundamental del manejo sostenible:

Parasitoides:

- *Aphidius* spp.: parasitoides específicos de áfidos
- *Lysiphlebus testaceipes*: parasitoide generalista
- *Praon* spp.: efectivo contra pulgones grandes

Depredadores:

- Coccinélidos: *Hippodamia convergens*, *Cycloneda sanguinea*
- Sírpidos: larvas depredadoras de áfidos
- Crisopas: *Chrysoperla* spp.
- Carábidos: depredadores polívoros del suelo
- Arañas: control generalista

Entomopatógenos:

- *Beauveria bassiana*: hongo para control de diversos insectos
- *Metarhizium anisopliae*: efectivo contra plagas del suelo
- *Entomophthora* spp.: específico para áfidos

10.5.2 Estrategias de conservación

Refugios ecológicos:

- Franjas de vegetación nativa
- Cercos vivos con especies floríferas
- Cultivos trampa en bordes

Prácticas culturales favorables:

- Reducción de aplicaciones de amplio espectro
- Uso de insecticidas selectivos
- Mantenimiento de cobertura vegetal en períodos críticos

10.6 Control químico selectivo

10.6.1 Principios del control químico racional

El uso de insecticidas debe considerarse como último recurso, aplicando criterios de selectividad y oportunidad (Abdel-Baset & Dawabah, 2020):



Figura 46. Control químico selectivo.

Criterios de selección:

- Especificidad hacia la plaga objetivo
- Baja toxicidad para enemigos naturales
- Corto período de carencia
- Bajo impacto ambiental
- Rotación de modos de acción

10.6.2 Grupos de insecticidas y modos de acción

Tratamiento de semillas:

- Neonicotinoides (imidacloprid, tiametoxam): protección inicial contra plagas chupadoras
- Diamidas (ciantraniliprole): control de plagas masticadoras

Aplicaciones foliares:

- Piretroides (cipermetrina, deltametrina): amplio espectro, acción de contacto
- Organofosforados (dimetoato): sistémicos, para pulgones
- Neonicotinoides foliares: selectivos para chupadores
- Reguladores de crecimiento: específicos, bajo impacto

10.6.3 Resistencia y manejo

Estrategias antirresistencia:

- Rotación de ingredientes activos
- Mezclas con diferentes modos de acción
- Aplicación solo cuando se superen umbrales
- Dosis recomendadas según marbete
- Monitoreo de eficacia

10.7 Manejo integrado de plagas (MIP)

10.7.1 Componentes del MIP en cebada

El MIP integra múltiples tácticas de control en un sistema coherente y sostenible:

1. Medidas preventivas:

- Selección de variedades con tolerancia a plagas
- Rotación de cultivos (mínimo 2 años sin gramíneas para nematodos)
- Fecha de siembra óptima (escape temporal)
- Densidad de siembra adecuada
- Nutrición balanceada del cultivo
- Eliminación de hospederos alternativos

2. Monitoreo sistemático:

- Establecimiento de red de monitoreo regional
- Uso de sistemas de alerta temprana
- Registro histórico de plagas
- Capacitación de técnicos y productores

3. Control cultural:

- Labranza estratégica para exposición de larvas
- Manejo de rastrojos
- Control de malezas hospederas
- Sincronización de siembras a nivel regional

4. Control biológico aumentativo:

- Liberaciones inoculativas de parasitoides
- Aplicación de entomopatógenos
- Instalación de refugios para enemigos naturales

5. Control químico dirigido:

- Aplicación por manchones en plagas agregadas
- Tratamiento de bordes en invasiones
- Uso de atrayentes y feromonas
- Aplicación nocturna para proteger polinizadores

10.7.2 Implementación práctica del MIP

Fase de planificación:

1. Análisis del historial de plagas del lote
2. Evaluación de riesgo según rotación previa
3. Selección de variedad y tratamiento de semilla
4. Establecimiento de protocolo de monitoreo

Fase vegetativa:

1. Monitoreo semanal desde emergencia

2. Evaluación de enemigos naturales
3. Decisión según umbral económico
4. Registro de intervenciones

Fase reproductiva:

1. Intensificación del monitoreo
2. Priorización del control biológico
3. Aplicaciones selectivas si necesario
4. Protección de polinizadores

Evaluación y ajuste:

1. Análisis de eficacia de medidas
2. Cálculo de relación beneficio/costo
3. Documentación para siguientes campañas
4. Ajuste de umbrales locales

10.7.3 Casos de éxito en América Latina

Argentina - Programa MIP en cebada cervecera: Reducción del 60% en aplicaciones de insecticidas mediante:

- Red de trampas de feromonas
- Liberación masiva de *Trichogramma*

- Umbrales ajustados regionalmente

Chile - Control biológico conservativo:

1. Establecimiento de corredores biológicos
2. Incremento del 40% en parasitismo natural
3. Reducción de pérdidas por BYDV

Ecuador - Manejo agroecológico en altura:

- Asociación con leguminosas
- Aplicación de extractos botánicos
- Mantenimiento de biodiversidad funcional

10.8 Conclusiones del capítulo

El manejo efectivo de plagas demanda enfoque holístico que integre conocimiento biológico profundo de los organismos plaga, monitoreo sistemático de poblaciones mediante métodos estandarizados, y aplicación secuencial de tácticas de control complementarias según umbrales económicos previamente establecidos. La implementación exitosa del Manejo Integrado de Plagas (MIP) trasciende la reducción de costos directos de producción e impactos ambientales negativos, contribuyendo sustancialmente a la sostenibilidad del sistema productivo mediante preservación de enemigos naturales, minimización de riesgos de resistencia a insecticidas, y mantenimiento de funciones ecosistémicas que sustentan la productividad a largo plazo.

El énfasis debe posicionarse en estrategias preventivas rotaciones apropiadas, fechas de siembra ajustadas, variedades resistentes y fortalecimiento de mecanismos de control biológico natural conservación de parasitoides, depredadores, entomopatógenos, reservando herramientas químicas exclusivamente para situaciones donde las poblaciones superan umbrales económicos documentados y las alternativas de menor impacto resultan insuficientes. La capacitación continua de productores y técnicos en identificación temprana, reconocimiento de enemigos naturales y criterios de toma de decisiones, junto con el establecimiento de redes regionales de monitoreo que generen información sobre dinámicas poblacionales y alerten anticipadamente sobre riesgos emergentes, constituyen elementos fundamentales para el éxito de programas de MIP contextualizados a las realidades socioeconómicas y agroecológicas específicas de cada territorio productor.

CAPÍTULO XI

11 ENFERMEDADES

Las enfermedades fúngicas, bacterianas y virales representan una de las principales limitantes para el rendimiento y la calidad industrial de la cebada. Este capítulo aborda los patosistemas más relevantes, como roya, oídio, escaldadura, mancha en red y fusariosis, describiendo su etiología, síntomas, epidemiología y métodos de disseminación. Además, se analizan los factores edafoclimáticos que condicionan la aparición de epidemias, especialmente en ambientes fríos y húmedos de altura.

El manejo fitosanitario se plantea desde una perspectiva integrada, donde la resistencia genética, la rotación de cultivos, el manejo de rastrojos, la aplicación estratégica de fungicidas y el uso de sistemas de alerta epidemiológica constituyen herramientas complementarias. El objetivo es mantener las poblaciones del patógeno por debajo del umbral económico de daño, reduciendo impactos ambientales y prolongando la vida útil de los productos de control.

Las enfermedades representan factores bióticos limitantes críticos en la producción global de cebada, generando pérdidas entre 15-50% del rendimiento potencial según la susceptibilidad genética del cultivar, condiciones ambientales prevalentes particularmente humedad relativa, temperatura y duración de períodos de mojado foliar y prácticas de manejo implementadas. La comprensión integral de agentes causales hongos, bacterias, virus, su epidemiología ciclos de infección, dispersión, condiciones predisponentes y las opciones de control disponibles resistencia genética, prácticas culturales, fungicidas, control biológico

resulta esencial para desarrollar sistemas productivos sostenibles que equilibren productividad económica con minimización de riesgos fitosanitarios y reducción de dependencia en fungicidas de síntesis química con impactos ambientales y costos económicos significativos.

11.1 Enfermedades fungosas

Los hongos fitopatógenos representan el grupo más diverso y económicamente importante de patógenos que afectan al cultivo de cebada. Su capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales y su variabilidad genética los convierten en una amenaza constante para la producción cerealera (Shekhawat et al., 2022).

11.1.1 Royas (amarilla, parda, del tallo)

Las royas constituyen el complejo de enfermedades más destructivo en cebada, caracterizándose por su naturaleza biotrófica obligada y su alta especificidad hospedante.

Roya amarilla (*Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*)

La roya amarilla es considerada la enfermedad más devastadora de la cebada en regiones con temperaturas frescas y alta humedad relativa. El patógeno se manifiesta inicialmente en las hojas formando pústulas (uredosoros) de color amarillo anaranjado, dispuestas en líneas paralelas a las nervaduras, creando un patrón característico que facilita su diagnóstico. En infecciones severas, las pústulas pueden extenderse a las vainas foliares y espigas, comprometiendo significativamente el llenado del grano.

El desarrollo óptimo del patógeno ocurre bajo temperaturas entre 10-15°C, condiciones térmicas frecuentes en regiones de altura durante períodos de transición estacional, combinadas con períodos prolongados de rocío o humedad foliar 6-8 horas continuas que facilitan la germinación de esporas y penetración de estructuras infectivas a través de estomas o cutícula. El ciclo completo de infección desde germinación esporífera hasta producción de nueva esporulación se completa en 10-14 días bajo condiciones ambientales favorables, permitiendo múltiples generaciones sucesivas durante el ciclo del cultivo que intensifican progresivamente la severidad epidémica mediante acumulación exponencial de inóculo. Las pérdidas productivas pueden alcanzar hasta 90% en variedades altamente susceptibles cuando la infección primaria se establece durante estados tempranos del desarrollo vegetativo, momento en que el cultivo carece de mecanismos compensatorios efectivos y la enfermedad dispone de período prolongado para desarrollar epidemias severas que comprometen tanto componentes numéricos del rendimiento como atributos cualitativos del grano.

Roya parda (*Puccinia hordei*)

La roya parda exhibe distribución geográfica más amplia que la roya amarilla por su adaptación a temperaturas superiores óptimo entre 15-22°C característico de zonas productoras de menor altitud o períodos estacionales más cálidos. Las pústulas se distinguen por coloración pardo-anaranjada, morfología circular a elíptica, y distribución aleatoria dispersa sobre el limbo foliar sin el patrón estriado característico de roya amarilla. Aunque típicamente ocasiona pérdidas moderadas 15-30%, inferiores a las de roya amarilla, puede desarrollar epidemias severas bajo condiciones de

humedad relativa elevada sostenida y temperaturas moderadas durante períodos prolongados.

El patógeno sobrevive durante períodos interpoblacionales en rastros infectados y rebrotes voluntarios de cebada que emergen posterior a cosecha, constituyendo fuentes de inóculo primario para infecciones tempranas del ciclo subsecuente. El ciclo sexual completo requiere hospedante alternante (*Ornithogalum* spp., plantas ornamentales de la familia Asparagaceae), aunque en numerosas regiones productoras el ciclo asexual clonal predomina absolutamente, perpetuándose mediante uredosporas que infectan sucesivamente hospedantes gramíneos sin requerir recombinación sexual, lo cual simplifica el manejo preventivo al eliminar la necesidad de controlar hospedantes alternativos.

Roya del tallo (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici*)

Aunque menos frecuente en cebada que en trigo, la roya del tallo puede causar pérdidas significativas cuando ocurren infecciones tardías. Las pústulas son de mayor tamaño, color marrón oscuro a negro, y rompen la epidermis del tallo y vainas foliares, debilitando estructuralmente la planta y predisponiéndola al vuelco.



Figura 47. Royas en cebada (comparativa: amarilla, parda y del tallo).

11.1.2 Oídio (*Blumeria graminis f. sp. hordei*)

El oídio es una enfermedad de importancia creciente en sistemas de producción intensiva. El síntoma característico es la formación de un micelio superficial blanquecino a gris pálido que cubre hojas, vainas y eventualmente espigas. Las colonias fúngicas producen haustorios que penetran las células epidérmicas, extrayendo nutrientes y agua del hospedante.

La enfermedad prospera bajo temperaturas moderadas 15-20°C y humedad relativa elevada superiores al 70% aunque, a diferencia de royas y otros patógenos foliares, no requiere agua libre superficial para que las esporas germinen e infecten, lo cual amplía su ventana epidémica a condiciones de alta humedad atmosférica sin precipitaciones directas. Las infecciones tempranas durante emergencia y establecimiento reducen significativamente el desarrollo del sistema radical por compromiso de tejidos vasculares en la base del tallo, inhiben el macollamiento efectivo mediante destrucción de yemas axilares, y disminuyen el número de

espigas fértiles por aborto de tallos secundarios comprometidos. En estadios avanzados del desarrollo, los tejidos colonizados experimentan necrosis progresiva manifestada como pardecimiento y muerte prematura, reduciendo el área foliar fotosintéticamente activa disponible para sostener el llenado de grano y acelerando la senescencia que acorta el período efectivo de acumulación de reservas en el endospermo.

11.1.3 Carbones

Los carbones son enfermedades sistémicas que afectan directamente la producción de grano, reemplazando total o parcialmente los tejidos florales por masas de esporas del patógeno.

Carbón vestido (*Ustilago hordei*)

El carbón vestido se distingue porque las masas de teliosporas permanecen inicialmente cubiertas por una membrana delgada constituida por restos del pericarpio del grano, la cual posteriormente se fragmenta. La infección ocurre durante floración cuando teliosporas depositadas sobre estigmas receptivos germinan y penetran el ovario en desarrollo. El micelio permanece en estado quiescente dentro del embrión de la semilla resultante hasta la germinación subsecuente, momento en que se reactiva y coloniza sistemáticamente la plántula mediante crecimiento intercelular hasta alcanzar el meristema apical, estableciéndose en la espiga en formación.

Carbón desnudo (*Ustilago nuda*)

A diferencia del carbón vestido, las masas esporíferas del carbón desnudo quedan completamente expuestas al ambiente desde estadios tempranos de espigado, la membrana protectora se desintegra rápidamente, liberando

teliosporas polvosas durante la floración del cultivo que son dispersadas por viento hacia flores receptivas de plantas sanas circundantes. El patógeno se transmite exclusivamente como micelio latente intraembrionario no como esporas superficiales adheridas al grano lo cual demanda tratamientos sistémicos de semilla para su control efectivo, dado que fungicidas de contacto superficial no alcanzan el micelio interno. Las plantas infectadas generalmente espigan 3-5 días antes que individuos sanos, asincronía fenológica que maximiza la probabilidad de dispersión efectiva al coincidir la liberación de esporas con la apertura floral de la población sana, facilitando la perpetuación del patógeno.

11.1.4 Enfermedades foliares

Mancha en red (*Pyrenophora teres*)

La mancha en red constituye una de las patologías foliares de mayor relevancia en el cultivo de cebada debido a su amplia distribución y capacidad de reducir el rendimiento. Se manifiesta en dos variantes: una forma reticulada y otra moteada. En sus etapas iniciales aparecen diminutas áreas necróticas que, con el avance de la infección, se transforman en manchas alargadas con aspecto de red o en lesiones circulares rodeadas por halos cloróticos. El hongo causal permanece viable en los residuos de cosecha durante varios ciclos agrícolas, lo que lo convierte en una fuente persistente de inóculo primario si no se emplean prácticas adecuadas de manejo del rastrojo.

Escaldadura (*Rhynchosporium secalis*)

La escaldadura se caracteriza por la aparición de lesiones alargadas u ovaladas, de bordes netos, con un centro de tonalidad blanquecina o gris y márgenes de color pardo oscuro. Este patógeno encuentra condiciones óptimas de desarrollo en ambientes frescos —entre 10 y 20 °C— combinados con humedad foliar sostenida, ya sea por lluvias, rocío o riego por aspersión. Cuando la enfermedad se instala en fases tempranas del crecimiento, puede comprometer significativamente el área fotosintética y ocasionar pérdidas de rendimiento superiores al 40 %.

11.2 Enfermedades bacterianas

Las bacteriosis en cebada, aunque menos frecuentes que las enfermedades fúngicas, pueden causar pérdidas significativas bajo condiciones específicas.



Figura 48. Enfermedades bacterianas en cebada.

Tizón bacteriano (*Xanthomonas translucens* pv. *translucens*)

El tizón bacteriano produce lesiones acuosas inicialmente, que evolucionan hacia estrías necróticas con exudados bacterianos amarillentos. La bacteria se transmite principalmente por semilla y puede sobrevivir en rastrojos. Las condiciones de alta humedad y temperaturas moderadas a altas (20-30°C) favorecen el desarrollo de epidemias.

11.3 Enfermedades virales

Virus del enanismo amarillo de la cebada (BYDV)

El BYDV es el complejo viral más importante en cebada, transmitido exclusivamente por áfidos. Las plantas afectadas presentan enanismo, amarillamiento progresivo desde el ápice foliar, reducción del crecimiento radicular y retraso en la formación de espigas. La infección temprana puede reducir el rendimiento en más del 20%.

El virus comprende varios serotipos con especificidad variable por diferentes especies de áfidos vectores. Las temperaturas cercanas a 20°C favorecen tanto la multiplicación del virus como la actividad de los vectores, incrementando la incidencia de la enfermedad.



Figura 49. Enfermedades virales en cebada.

11.4 Epidemiología

La comprensión de los procesos epidemiológicos es fundamental para el desarrollo de estrategias de manejo efectivas. Los componentes básicos del triángulo de la enfermedad (hospedante susceptible, patógeno virulento y ambiente favorable) interactúan dinámicamente a lo largo del ciclo del cultivo.



Figura 50. Epidemiología en cebada.

Fuentes de inóculo y dispersión

Las fuentes primarias de inóculo varían según el patógeno: semilla (carbones, bacteriosis), rastros (manchas foliares), hospedantes alternativos (royas) y vectores (virosis). La dispersión puede ser por viento (royas, oídio), salpique de lluvia (manchas foliares), insectos vectores (virus) o implementos agrícolas (bacterias).

Factores ambientales

La temperatura, humedad relativa, duración del período de mojado foliar y radiación solar son los principales factores que regulan el desarrollo epidémico. Cada patógeno presenta requerimientos específicos que determinan su distribución geográfica y estacional.

11.5 Resistencia genética

Resistencia genética a enfermedades en cebada

El uso de resistencia genética es considerado el método más eficiente, económico y ambientalmente seguro para reducir el impacto de enfermedades en los cultivos de cebada. Desde el mejoramiento vegetal se reconocen dos modalidades principales de resistencia, que difieren en su base genética, amplitud de protección y estabilidad a lo largo del tiempo.

Resistencia vertical o cualitativa

Este tipo de resistencia está determinada por uno o pocos genes de efecto mayor. Proporciona niveles elevados de protección o incluso inmunidad frente a razas específicas del patógeno. No obstante, su efectividad suele

ser temporal, ya que los microorganismos pueden modificar su virulencia y superar esta defensa a través de mutaciones o recombinaciones genéticas.

Resistencia horizontal o cuantitativa

Se basa en la acción conjunta de numerosos genes de menor efecto. A diferencia de la resistencia vertical, no evita completamente la infección, pero limita de manera significativa el desarrollo de la enfermedad. Su efecto es más estable y prolongado, ya que ofrece protección frente a múltiples razas del patógeno y es menos susceptible a ser superada por cambios evolutivos del mismo.

Estrategias de integración genética

La combinación deliberada de ambos tipos de resistencia proceso conocido como piramidación de genes se perfila como una de las alternativas más eficaces para obtener variedades de cebada con resistencia durable, capaz de sostenerse en condiciones cambiantes y frente a poblaciones patogénicas diversas.

11.6 Control químico

El control químico debe considerarse como un componente dentro de una estrategia integrada de manejo. Los fungicidas disponibles incluyen:

Fungicidas protectantes

Actúan previniendo la infección, requiriendo aplicación antes del establecimiento del patógeno. Incluyen compuestos como mancozeb y clorotalonil.

Fungicidas sistémicos

Los fungicidas de acción sistémica poseen la capacidad de ingresar a los tejidos vegetales y desplazarse a través del xilema o floema, lo que les permite ejercer efectos tanto preventivos como curativos según el momento de aplicación. Dentro de los grupos más empleados en cebada destacan los triazoles (como propiconazol y tebuconazol), que inhiben la síntesis de ergosterol en hongos; las estrobilurinas (como azoxistrobina), que bloquean la respiración mitocondrial del patógeno; y las carboxamidas (grupo SDHI), que interfieren en la actividad del complejo II de la cadena respiratoria.

No obstante, la decisión de aplicar fungicidas no debe depender únicamente de la presencia visual de síntomas. Se recomienda actuar bajo criterios de umbral económico de daño, considerando factores como el estado fenológico del cultivo, la densidad del inóculo presente o esperado, y las condiciones climáticas favorables para la infección. Esta racionalidad en el uso de productos químicos evita gastos innecesarios, reduce el impacto ambiental y retrasa la aparición de cepas resistentes.

11.7 Manejo integrado de enfermedades

El manejo integrado de enfermedades es un enfoque que combina diversas estrategias de control con el objetivo de mantener las poblaciones de patógenos por debajo del nivel que ocasiona pérdidas económicas significativas. Su fundamento radica en reducir la dependencia exclusiva del control químico, promoviendo prácticas sostenibles que preserven la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y la eficacia futura de las herramientas disponibles.

Principales componentes del MIE en cebada

1. **Prácticas culturales:** Incluyen la rotación de cultivos con especies no hospedantes, la gestión adecuada de rastrojos para disminuir el inóculo inicial, la elección de fechas de siembra que eviten coincidencias con condiciones favorables para el patógeno, densidades de siembra que permitan buena aireación del follaje y una fertilización equilibrada que no predisponga a la planta a enfermedades.
2. **Resistencia genética:** Selección de cultivares con resistencia comprobada frente a las enfermedades predominantes en la zona de producción. Esta estrategia disminuye la presión de infección y reduce la necesidad de aplicaciones fungicidas.
3. **Monitoreo y diagnóstico oportuno:** Implica la inspección periódica del lote para detectar síntomas iniciales y determinar la dinámica poblacional de los patógenos, lo cual permite intervenir en el momento adecuado.
4. **Control biológico:** Utilización de microorganismos antagonistas, bacterias o hongos benéficos que interfieren con el agente causal o inducen mecanismos de defensa en la planta.
5. **Uso racional de fungicidas:** Aplicación de productos químicos únicamente cuando los niveles de enfermedad alcanzan el umbral de acción. Se recomienda alternar o mezclar principios activos de diferentes modos de acción para prevenir la aparición de resistencia fungicida.

- 6. Sistemas de alerta y pronóstico:** Empleo de modelos epidemiológicos y herramientas de agricultura digital para predecir el riesgo de infección según variables meteorológicas, fase del cultivo e historial del lote. Esta información permite planificar medidas preventivas con mucha mayor precisión.

11.8 Conclusiones del capítulo

El control efectivo de las enfermedades en cebada requiere comprender el sistema patológico como una red compleja donde interactúan el agente causal, la planta hospedera y el entorno. Por ello, el manejo sanitario no puede limitarse a intervenciones aisladas, sino que debe fundamentarse en un enfoque integral que combine conocimiento epidemiológico, herramientas tecnológicas y criterios de sostenibilidad. En este contexto, la resistencia genética de las variedades representa el pilar fundamental del manejo, mientras que las prácticas agronómicas adecuadas y el uso criterioso de fungicidas actúan como herramientas complementarias para disminuir el avance de los patógenos.

El desarrollo de plataformas de pronóstico y toma de decisiones, sustentadas en el monitoreo del microclima, la humedad foliar, la presencia de esporas y la fase fenológica del cultivo, ofrece oportunidades para intervenir de manera precisa y oportuna. Estas tecnologías permiten reducir aplicaciones innecesarias, optimizar los costos de producción y minimizar los riesgos ambientales derivados del uso excesivo de agroquímicos. Paralelamente, la generación de conocimientos en resistencia genética durable, formulaciones de fungicidas con nuevos modos de acción y alternativas de control biológico resulta esencial para

anticiparse a escenarios futuros, especialmente ante la rápida evolución de razas patogénicas y las alteraciones climáticas globales.

Finalmente, la sostenibilidad del sistema productivo depende también de las capacidades humanas. La formación continua de agricultores, técnicos y asesores en diagnóstico temprano, reconocimiento de síntomas, comprensión de ciclos epidemiológicos y manejo integrado constituye un componente estratégico. Solo mediante la articulación entre ciencia, tecnología y educación agraria será posible mantener la productividad de la cebada sin comprometer el equilibrio ambiental ni la seguridad alimentaria.

CAPÍTULO XII

12 BIOESTIMULANTES Y TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN

El mejoramiento genético ha sido la base para transformar la cebada desde formas silvestres de bajo rendimiento hasta variedades adaptadas a climas diversos y exigencias industriales específicas. Este capítulo explora la evolución de los programas de mejoramiento, desde la selección empírica tradicional hasta la incorporación de técnicas modernas como marcadores moleculares, hibridación controlada, selección asistida por genómica y edición génica.

Se abordan los principales objetivos del mejoramiento: aumento de rendimiento, tolerancia a estrés abiótico, resistencia a enfermedades, mejora en la calidad maltera y adaptación a sistemas agroecológicos específicos. También se analiza el papel de instituciones como el INIAP en Ecuador y redes internacionales que conservan bancos de germoplasma. El capítulo concluye destacando la importancia de la diversidad genética y la necesidad de desarrollar variedades resilientes frente al cambio climático.

12.1 Conceptos y clasificación de bioestimulantes

12.1.1 Definición y marco conceptual

Los bioestimulantes constituyen una categoría emergente de productos agrícolas que han revolucionado el manejo nutricional y fisiológico de los cultivos modernos. Según la definición adoptada por el Consejo Europeo de la Industria de Bioestimulantes (EBIC), un bioestimulante es cualquier sustancia o microorganismo que, aplicado a las plantas o la rizosfera, estimula procesos naturales para mejorar la absorción de nutrientes, la

eficiencia nutricional, la tolerancia al estrés abiótico y la calidad del cultivo, independientemente de su contenido de nutrientes (Ferioun et al., 2025).

En el cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.), el uso de bioestimulantes se ha consolidado como una estrategia clave para mejorar tanto el rendimiento como la calidad industrial del grano. A diferencia de los fertilizantes y productos fitosanitarios convencionales, los bioestimulantes no actúan directamente como fuentes de nutrientes ni como agentes de control de patógenos; su función radica en potenciar los procesos fisiológicos de la planta, incrementando su eficiencia metabólica y su capacidad de adaptación frente a condiciones de estrés biótico y abiótico. En este sentido, su empleo no reemplaza la fertilización ni la sanidad vegetal, sino que se integra como una herramienta complementaria dentro de un manejo agronómico sostenible del cultivo (Goñi et al., 2021).

12.1.2 Clasificación de bioestimulantes

Los bioestimulantes pueden clasificarse según diferentes criterios:

Por su origen:

- **Orgánicos:** Derivados de materias primas naturales (extractos de algas, ácidos húmicos, aminoácidos)
- **Inorgánicos:** Elementos minerales con efectos bioestimulantes (silicio, selenio, cobalto)
- **Microbianos:** Microorganismos benéficos (bacterias PGPR, hongos micorrízicos, Trichoderma)
- **Sintéticos:** Compuestos químicos análogos a sustancias naturales

Por su composición química principal:

- Sustancias húmicas
- Extractos de algas marinas
- Aminoácidos y péptidos
- Quitosano y otros polisacáridos
- Compuestos inorgánicos
- Microorganismos benéficos

Por su modo de acción:

- Mejoradores de la nutrición
- Inductores de resistencia al estrés
- Estimuladores del crecimiento
- Mejoradores de la calidad

12.2 Mecanismos de acción

12.2.1 Acción a nivel celular y molecular

Los bioestimulantes operan a través de múltiples mecanismos que modulan procesos fisiológicos y bioquímicos fundamentales en la planta de cebada. A nivel celular, los bioestimulantes actúan mediante diversos mecanismos fisiológicos y moleculares que optimizan el funcionamiento de la planta de cebada. Entre los procesos más relevantes se encuentran:

1. **Activación de rutas enzimáticas:** Estos compuestos pueden desencadenar la actividad de enzimas claves involucradas en el metabolismo primario y secundario. Un ejemplo notable son las citoquininas derivadas de extractos de algas, las cuales estimulan

enzimas relacionadas con la división celular, la síntesis proteica y la generación de nuevos tejidos.

2. **Regulación de la expresión génica:** Estudios recientes evidencian que algunos bioestimulantes influyen directamente en la expresión de genes vinculados con la tolerancia a estrés hídrico, térmico o salino, así como con una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes. Esto ocurre mediante la activación de factores de transcripción específicos que modulan la respuesta de la planta ante condiciones adversas.
3. **Protección estructural de membranas y paredes celulares:** Determinadas moléculas bioactivas contribuyen a preservar la integridad celular. El calcio, por ejemplo, fortalece la pared celular al formar pectatos que aumentan su rigidez estructural. Paralelamente, aminoácidos como la glicina-betaína actúan como osmolitos compatibles, reduciendo los daños provocados por el estrés osmótico y estabilizando las membranas celulares (Fouad & Fouad, 2022).

12.2.2 Efectos fisiológicos en cebada

Los bioestimulantes inducen respuestas fisiológicas específicas en el cultivo de cebada que se traducen en mejoras productivas:

Sistema radicular: Estimulan el desarrollo de raíces secundarias y pelos absorbentes, incrementando hasta un 35% la superficie de absorción. Estudios realizados en la provincia de Bolívar, Ecuador, demostraron que la aplicación de ácidos húmicos incrementó significativamente la biomasa radicular en cebada variedad Cañicapa.

Metabolismo del nitrógeno: Mejoran la eficiencia de uso del nitrógeno mediante la activación de enzimas como la nitrato reductasa y glutamina sintetasa, fundamentales para la asimilación de este nutriente. Durante la etapa de llenado de grano, período crítico para la calidad maltera, los bioestimulantes optimizan la translocación del nitrógeno acumulado pre-antesis hacia los granos (Fouad & Fouad, 2022).

Fotosíntesis y metabolismo del carbono: Incrementan la eficiencia fotosintética mediante el aumento del contenido de clorofila y la optimización de la actividad de la RuBisCO. Extractos de algas marinas han mostrado incrementos del 15-20% en la tasa fotosintética neta en condiciones de campo.

12.3 Bioestimulantes a base de algas marinas

12.3.1 Composición y propiedades

Los extractos de algas marinas, particularmente aquellos derivados de *Ascophyllum nodosum*, *Ecklonia maxima* y *Laminaria digitata*, representan una de las categorías más importantes de bioestimulantes en la producción de cebada. Su composición incluye más de 60 nutrientes esenciales y compuestos bioactivos (Tahir et al., 2022):

- **Fitohormonas naturales:** Auxinas (50-200 mg/kg), citoquininas (10-50 mg/kg), giberelinas (1-10 mg/kg)
- **Polisacáridos complejos:** Alginatos, fucoidanos, laminaranos
- **Betaínas y compuestos osmoprotectores:** Glicina-betaína, prolina-betaína
- **Micronutrientes quelatados naturalmente:** Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo

- **Aminoácidos libres y péptidos de bajo peso molecular**
- **Manitol y otros polioles**

12.3.2 Aplicación en cebada: Caso Seaweed Extract

El producto comercial Seaweed Extract, evaluado en ensayos experimentales en Laguacoto, Ecuador, demostró efectos significativos en el cultivo de cebada. Con una composición de 3% K₂O y 5.5% de materia orgánica, aplicado a dosis de 1-2 L/ha en 200 L de agua, este bioestimulante mostró los siguientes resultados (Bahuguna et al., 2022):

Efectos en el desarrollo vegetativo: El tratamiento con extracto de algas incrementó la altura de planta en 6.3% comparado con el testigo, alcanzando 101 cm en la variedad Cañicapa. Este incremento se atribuye a la promoción del crecimiento celular y la mejora en el vigor de las plantas, efectos documentados por (Cozzolino et al., 2021).

Protección contra estrés biótico: Los metabolitos presentes en los extractos, particularmente las betaínas, confieren protección contra el ataque de patógenos. En los ensayos de campo, se observó una reducción en la incidencia de enfermedades foliares, aunque el efecto no fue estadísticamente significativo en todos los casos.

12.3.3 Modo de aplicación y momentos críticos

La eficacia de los bioestimulantes de algas marinas en cebada depende crucialmente del momento y método de aplicación:

1. **Primera aplicación:** Durante el macollamiento (30-40 días después de siembra), para estimular el desarrollo de macollos productivos

2. **Segunda aplicación:** Pre-floración, para optimizar la fertilidad de las flores y el cuajado de granos
3. **Tercera aplicación (opcional):** Durante el llenado de grano, para mejorar el peso y calidad

12.4 Ácidos húmicos y fúlvicos

12.4.1 *Naturaleza y origen*

Los ácidos húmicos y fúlvicos son macromoléculas polielectrolíticas complejas derivadas de la humificación de la materia orgánica. Estos compuestos representan la fracción más estable y bioactiva del humus del suelo, con pesos moleculares que varían desde 10,000 hasta 100,000 Daltons para ácidos húmicos y menos de 10,000 para ácidos fúlvicos (Tarafdar, 2022).

12.4.2 *Propiedades bioestimulantes en cebada*

En investigaciones realizadas con cebada variedad Cañicapa en Ecuador, la aplicación de ácidos húmicos (0.75 L/ha en 300 L de agua) generó respuestas productivas notables:

Mejora del rendimiento: Se obtuvo un rendimiento de 3,311.2 kg/ha, representando un incremento del 87% sobre el testigo sin bioestimulante (1,769.9 kg/ha). Este incremento se atribuye a múltiples factores:

- **Mejora en la disponibilidad de nutrientes:** Los ácidos húmicos quelatan micronutrientes, haciéndolos más disponibles para la absorción radicular

- **Estimulación del desarrollo radicular:** Actúan como auxinas naturales, promoviendo la elongación radicular
- **Incremento en la CIC del suelo:** Mejoran la retención de cationes en la rizosfera

Efectos en componentes del rendimiento: El tratamiento con ácidos húmicos incrementó significativamente el número de granos por espiga (27 granos vs 23 en el testigo), variable crítica para el rendimiento final en cebada.

12.4.3 Interacción con la nutrición mineral

Los ácidos húmicos muestran una interacción especialmente favorable con la fertilización fosfatada, fenómeno de particular interés en los suelos andinos, donde gran parte del fósforo aplicado suele quedar inmovilizado por complejos con aluminio, hierro o calcio. Diversas investigaciones señalan que la combinación de ácidos húmicos con fuentes fosfatadas mejora la disponibilidad del fósforo en la rizosfera, al formar complejos solubles y reducir su fijación en el suelo. Como resultado, se ha observado que esta sinergia puede aumentar la eficiencia en el uso del fósforo en hasta un 40 %, optimizando la nutrición del cultivo y disminuyendo la dependencia de insumos externos (Dubey & Misra, 2025).

12.5 Aminoácidos y proteínas hidrolizadas

12.5.1 Fuentes y procesos de obtención

Los aminoácidos y péptidos utilizados como bioestimulantes en cebada se obtienen a partir de distintas materias primas y procesos de transformación. Dependiendo de su origen, pueden clasificarse en:

- **Fuente vegetal:** derivados de proteínas presentes en soya, maíz, alfalfa y otras leguminosas, ampliamente utilizados por su compatibilidad fisiológica con cultivos cerealícolas.
- **Fuente animal:** obtenidos principalmente del procesamiento de subproductos como colágeno, queratina o hemoglobina, los cuales aportan una alta concentración de aminoácidos esenciales.
- **Fuente microbiana:** generados mediante fermentaciones bacterianas o fúngicas, donde los microorganismos producen proteínas que posteriormente se hidrolizan para liberar compuestos bioactivos.

En cuanto al método de obtención, la hidrólisis proteica puede realizarse mediante distintas técnicas, cada una con características específicas:

- **Hidrólisis enzimática:** emplea proteasas controladas para liberar péptidos cortos y aminoácidos concretos, conservando su funcionalidad biológica.
- **Hidrólisis ácida:** rompe las cadenas proteicas de manera más agresiva, liberando una alta proporción de aminoácidos libres, aunque puede degradar algunos compuestos sensibles.
- **Hidrólisis alcalina:** permite mantener aminoácidos inestables, como el triptófano, evitando su degradación y preservando su valor fisiológico.

12.5.2 Funciones en el metabolismo de la cebada

En la fisiología de la cebada, los aminoácidos cumplen funciones esenciales que trascienden su papel como componentes estructurales de las proteínas. Entre los procesos más relevantes se destacan:

- **Participación como precursores metabólicos:** Algunos aminoácidos intervienen directamente en rutas biosintéticas claves. La glicina y el ácido glutámico participan en la formación de clorofila, contribuyendo al desarrollo fotosintético de la planta. Por su parte, el triptófano es el punto de partida para la síntesis del ácido indolacético (AIA), una auxina fundamental para el crecimiento celular y la elongación de tallos y raíces.
- **Osmorregulación bajo condiciones de estrés hídrico:** En zonas altoandinas entre 2.400 y 3.300 m s. n. m. donde la cebada suele enfrentar períodos de déficit hídrico, ciertos aminoácidos como la prolina y la glicina-betaína actúan como osmolitos compatibles. Estos compuestos permiten mantener el equilibrio osmótico celular, estabilizar proteínas y preservar la integridad de membranas durante situaciones de sequía o bajas temperaturas.
- **Transporte y movilización de nutrientes mediante quelación:** La glicina, lisina y otros aminoácidos pueden formar complejos solubles con micronutrientes como hierro, zinc o manganeso. Esta capacidad de quelación facilita su transporte a través del floema y mejora su disponibilidad en tejidos jóvenes o en órganos de alta demanda metabólica, favoreciendo un crecimiento equilibrado.

12.6 Micronutrientes complejados: Calcio-Boro

12.6.1 *Importancia del complejo Calcio-Boro en cebada*

El uso conjunto de calcio y boro se ha consolidado como una de las interacciones nutricionales más eficientes para potenciar el desarrollo fisiológico de la cebada y otros cereales. Esta sinergia resulta especialmente relevante en etapas de crecimiento activo y diferenciación reproductiva, donde la demanda de ambos elementos se incrementa. Ensayos de campo realizados en Lagucoto, Ecuador, utilizando las variedades Cañicapa y Voyager, evidenciaron que la aplicación foliar de este complejo bioestimulante generó respuestas superiores en vigor vegetativo, uniformidad de espigas y llenado de grano.

Los formulados comerciales empleados en dichas evaluaciones presentan habitualmente la siguiente composición:

- **Calcio (CaO):** 14,00 % p/v
- **Boro:** 0,80 % p/v
- **Extracto de algas marinas:** 35,70 % p/v
- **Manitol:** 1,32 % p/v
- **Ácido algínico:** 3,60 % p/v
- **Potasio (K₂O):** 7,00 % p/v

Esta combinación no solo aporta nutrientes esenciales, sino que también incorpora compuestos orgánicos bioactivos (algas, manitol, alginatos), los

cuales mejoran la absorción y movilidad de calcio y boro dentro de la planta, fortalecen tejidos meristemáticos y optimizan los procesos de polinización y cuajado de granos

12.6.2 Resultados experimentales en cebada

Los ensayos efectuados con el complejo Calcio-Boro en la variedad de cebada Voyager evidenciaron una clara relación dosis-respuesta, lo que confirma la sensibilidad del cultivo a este bioestimulante. La dosis de 1,25 L/ha permitió alcanzar el mayor rendimiento en grano, con 4.832,5 kg/ha, valor que prácticamente duplicó la producción obtenida en la parcela testigo (2.529,97 kg/ha), lo que representa un incremento cercano al 91 %.

Este aumento en la productividad estuvo asociado a mejoras directas en los componentes del rendimiento, entre ellos:

- **Longitud de la espiga:** pasó de 9,33 cm en el testigo a 12,33 cm cuando se aplicó 1 L/ha, reflejando una mayor capacidad de formación de granos.
- **Número de espigas por metro cuadrado:** se observó un incremento de 22 espigas/m² en el control a 45 espigas/m² con la dosis de 0,25 L/ha, evidenciando un efecto temprano sobre la macollamiento y establecimiento del cultivo.
- **Peso hectolítrico:** los valores alcanzaron 60,38 kg/hl, indicador de una mejora en la densidad y sanidad del grano, atributos decisivos para la industria maltera.

Desde el punto de vista económico, la aplicación de 1,25 L/ha mostró una relación beneficio/costo de 0,67, lo que implica que por cada dólar invertido, el productor obtiene 0,67 dólares de rentabilidad neta, cifra positiva aunque dependiente del precio del grano y del costo del insumo en el mercado local.

12.6.3 Mecanismos de acción sinérgica

La sinergia entre calcio y boro se manifiesta especialmente durante la floración y formación del grano:

1. **División celular:** El boro es esencial para la síntesis de la pared celular, mientras que el calcio estabiliza las membranas
2. **Transporte de azúcares:** El boro facilita el transporte de carbohidratos desde las hojas hacia los granos en desarrollo
3. **Fertilidad del polen:** Ambos elementos son críticos para la viabilidad del polen y el crecimiento del tubo polínico

12.7 Fitohormonas y reguladores de crecimiento

12.7.1 Citoquininas en la producción de cebada

Las citoquininas son fitohormonas derivadas de adeninas con sustituyentes aromáticos que promueven la división celular y regulan múltiples procesos del desarrollo. En los ensayos con cebada Cañicapa, la aplicación de citoquininas (500 ml en 200 L de agua) mostró efectos específicos (Johnson et al., 2024):

Efectos fisiológicos documentados:

- Retraso de la senescencia foliar, manteniendo área fotosintética activa por más tiempo
- Promoción del macollamiento, incrementando el número de tallos productivos
- Mejora en la movilización de nutrientes hacia los granos

Peso hectolítrico: El tratamiento con citoquininas produjo el mayor peso hectolítrico (60.38 kg/hl), indicador clave de calidad para la industria maltera. Este incremento se relaciona con una mejor composición interna del grano y mayor densidad.

12.7.2 Auxinas y giberelinas

Aunque menos estudiadas en cebada que las citoquininas, estas hormonas juegan roles importantes:

Auxinas:

- Concentración típica en bioestimulantes: 5.20 ppm
- Promueven elongación celular y desarrollo radicular
- Regulan la dominancia apical y el ángulo de inserción de hojas

Giberelinas:

- Concentración típica: 0.36 ppm
- Estimulan la germinación y el crecimiento del tallo
- Importantes en la síntesis de α -amilasa durante la germinación

12.7.3 Aplicación práctica y consideraciones

La aplicación de reguladores de crecimiento debe considerar:

1. **Estado fenológico:** La respuesta varía según la etapa de desarrollo
2. **Condiciones ambientales:** Temperatura y humedad afectan la absorción y translocación
3. **Interacción con otros insumos:** Compatibilidad con fungicidas y fertilizantes foliares

12.8 Microorganismos benéficos

12.8.1 Bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR)

Las bacterias PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) colonizan la rizosfera y promueven el crecimiento mediante diversos mecanismos:

Fijación biológica de nitrógeno: Aunque la cebada no forma nódulos, bacterias como *Azospirillum brasilense* pueden fijar nitrógeno atmosférico en asociación con las raíces, aportando 20-40 kg N/ha.

Solubilización de fosfatos: Bacterias del género *Bacillus* y *Pseudomonas* secretan ácidos orgánicos que solubilizan fosfatos insolubles del suelo.

Producción de fitohormonas: Muchas PGPR producen AIA, citoquininas y giberelinas que estimulan el crecimiento vegetal.

12.8.2 Hongos micorrízicos arbusculares

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) forman simbiosis con aproximadamente el 80% de las plantas terrestres, incluyendo la cebada:

Beneficios documentados:

- Incremento del 30-50% en la absorción de fósforo
- Mejora en la absorción de micronutrientes (Zn, Cu, Fe)
- Mayor tolerancia a estrés hídrico y salino
- Protección contra patógenos radiculares

12.8.3 Trichoderma y otros hongos benéficos

Trichoderma spp. son hongos antagonistas con múltiples beneficios:

- **Control biológico:** Parasitan hongos fitopatógenos como *Fusarium* y *Rhizoctonia*
- **Inducción de resistencia sistémica:** Activan mecanismos de defensa de la planta
- **Producción de metabolitos promotores del crecimiento**

12.9 Evaluación de eficiencia y rentabilidad

12.9.1 Metodología de evaluación

La evaluación de bioestimulantes en cebada debe seguir protocolos rigurosos para determinar su eficacia real:

Diseño experimental: Se recomienda el uso de Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con mínimo 3 repeticiones, como se empleó en los estudios de Laguacoto.

Variables de respuesta críticas:

1. Componentes del rendimiento:

- Número de plantas/m²
- Número de espigas/m²
- Número de granos por espiga
- Peso de mil granos

2. Parámetros de calidad:

- Peso hectolítrico
- Contenido de proteína
- Poder germinativo (para cebada maltera)

3. Indicadores fisiológicos:

- Índice de área foliar
- Contenido de clorofila (SPAD)
- Eficiencia fotosintética

12.9.2 Análisis económico

La evaluación económica debe considerar:

Análisis beneficio/costo (B/C):

$$B/C = (\text{Ingreso bruto} - \text{Costos de producción}) / \text{Costos de producción}$$

Ejemplo del estudio en Ecuador:

- Tratamiento con Calcio-Boro: B/C = 1.26
- Tratamiento con Ácido húmico: B/C = 1.10
- Testigo sin bioestimulante: B/C = 0.24

Retorno de la inversión (ROI):

$$\text{ROI} = [(\text{Rendimiento tratado} - \text{Rendimiento testigo}) \times \text{Precio}] / \text{Costo del bioestimulante}$$

12.9.3 Factores que afectan la rentabilidad

1. **Costo del bioestimulante:** Varía entre \$8-90/ha según el producto
2. **Precio del grano:** La cebada certificada (\$30/quintal) justifica mejor la inversión que grano comercial
3. **Respuesta varietal:** Variedades modernas como Voyager responden mejor que variedades tradicionales
4. **Condiciones edafoclimáticas:** Mayor respuesta en suelos pobres o condiciones de estrés

12.9.4 Casos de éxito documentados

Caso 1: Provincia Bolívar, Ecuador

- Localidad: Laguacoto (2,622 msnm)
- Variedad: Cañicapa

- Bioestimulante: Calcio-Boro (2-3 ml/L)
- Incremento de rendimiento: 103% sobre testigo
- Beneficio neto adicional: \$828.35/ha

Caso 2: Programa INIAP-Cañicapa

- Superficie: 2,100 ha
- Rendimiento promedio con bioestimulantes: 2.0 t/ha
- Rendimiento tradicional: 0.83 t/ha
- Incremento: 141%

12.10 Conclusiones del capítulo

Los bioestimulantes se han consolidado como herramientas clave para la intensificación sostenible del cultivo de cebada, debido a su capacidad para mejorar el rendimiento, la calidad del grano y la eficiencia en el uso de nutrientes sin incrementar la presión ambiental sobre los agroecosistemas. La evidencia experimental muestra incrementos productivos que pueden superar el 50 % e incluso alcanzar valores cercanos al 100 % respecto a parcelas sin tratamiento, lo que demuestra su impacto agronómico cuando son aplicados de forma oportuna y técnicamente fundamentada.

Además, contribuyen a mejorar parámetros industriales críticos, como el peso hectolítrico y el contenido proteico, aspectos determinantes para la industria maltera y la producción de semilla certificada. Desde el punto de vista nutricional, optimizan la absorción y la movilización interna de nutrientes, reduciendo la dependencia de fertilizantes sintéticos y favoreciendo sistemas de producción más sostenibles.

Su utilización también se traduce en beneficios económicos, con relaciones beneficio/costo positivas que justifican la inversión, especialmente en sistemas tecnificados. Paralelamente, fortalecen la resiliencia del cultivo frente a condiciones de estrés hídrico, térmico y patogénico, lo cual adquiere especial relevancia ante la creciente variabilidad climática.

No obstante, su selección y aplicación requieren un análisis riguroso de las limitantes del sistema productivo, una evaluación económica precisa, su integración con el manejo general del cultivo y un monitoreo constante de resultados para asegurar su eficacia. Las tendencias futuras apuntan al desarrollo de formulaciones específicas para cada etapa fenológica, combinaciones sinérgicas de compuestos bioactivos, uso de nanotecnología para mejorar su estabilidad y liberación, e incorporación en esquemas de agricultura de precisión y manejo sitio-específico.

Para garantizar su adopción exitosa, es indispensable fortalecer la capacitación continua de productores y técnicos, así como promover investigaciones locales que permitan ajustar dosis, momentos y formas de aplicación a las condiciones particulares de cada zona productora.

GLOSARIO

Absorción de nutrientes: Proceso fisiológico mediante el cual las raíces captan agua y minerales disueltos del suelo, o a través de las hojas cuando se aplican soluciones foliares, para incorporarlos al metabolismo vegetal.

ADEVA (Análisis de Varianza): Técnica estadística utilizada para determinar si existen diferencias significativas entre varios tratamientos o factores evaluados en experimentos agrícolas.

Afanismo: Anomalía en la cual las espigas no desarrollan granos, generalmente asociada a fallas de polinización, déficit nutricional o estrés ambiental durante la floración.

Altura de planta (AP): Medición desde la base del tallo hasta la punta de la espiga, utilizada como indicador de vigor, arquitectura del cultivo y afinidad varietal.

Análisis de suelo: Evaluación física y química del suelo para determinar niveles de nutrientes, pH, materia orgánica y textura, información esencial para definir el plan de fertilización.

Bioestimulantes: Sustancias de origen orgánico o microbiano que, sin ser fertilizantes ni pesticidas, mejoran la eficiencia en el uso de nutrientes, estimulan el crecimiento y aumentan la tolerancia al estrés.

Bloques Completos al Azar (DBCA): Diseño experimental utilizado para ensayos agronómicos, donde los tratamientos se distribuyen aleatoriamente dentro de bloques, controlando la variabilidad ambiental del terreno.

Boro (B): Micronutriente clave en la germinación del polen, el crecimiento del tubo polínico y el adecuado cuajado de los granos.

Calcio (Ca): Nutriente esencial que fortalece la pared celular, mejora la estructura radicular y participa en la señalización intracelular.

Carbón (*Ustilago spp.*): Enfermedad de origen fúngico que reemplaza los granos de la espiga por masas oscuras de esporas, reduciendo severamente la calidad y el rendimiento.

Ciclo vegetativo: Conjunto de etapas de desarrollo de la cebada, que abarca desde la germinación hasta la maduración del grano, incluyendo macollamiento, encañado, espigamiento y floración.

Coefficiente de variación (CV): Relación porcentual entre la desviación estándar y la media de un conjunto de datos, utilizada para evaluar la precisión y homogeneidad de un experimento.

Control fitosanitario: Conjunto de prácticas preventivas y correctivas destinadas a evitar, reducir o eliminar plagas y enfermedades que afectan al cultivo.

Cuajado del grano: Fase en la cual, tras la fecundación, el ovario floral se transforma en grano; su éxito depende de una adecuada nutrición y viabilidad del polen.

Densidad de siembra: Cantidad de semillas sembradas por unidad de superficie, determinante para definir población de plantas, competencia intraespecífica y rendimiento final.

Diseño experimental: Plan estructurado que organiza la disposición de tratamientos en un ensayo agrícola para evaluar sus efectos con rigor científico y control de variabilidad.

Dormancia: Estado fisiológico de la semilla en el que, a pesar de tener condiciones favorables de humedad y temperatura, no germina debido a mecanismos internos de inhibición.

Encañado: Etapa del desarrollo en la cual los entrenudos del tallo se alargan y la espiga se prepara para emerger.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdel-Baset, S. H., & Dawabah, A. A. M. (2020). Phytonematodes Associating Wheat in North Eastern Egypt and Pathogenicity of *Heterodera avenae* on Certain Cereal Cultivars. *International Journal of Phytopathology*, 9(3), 165–172. <https://doi.org/10.33687/phytopath.009.03.3434>
- Angeletti, F. G. S., Pampana, S., Arduini, I., Saia, S., & Mariotti, M. (2024). Can Nitrogen Fertilization and Intercropping Modify the Quality and Nutrient Yield of Barley–Field Bean Forage? *Agronomy*, 14(6), 1166. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061166>
- Athnere, S., Chaplot, P. C., Yadav, P., & Garg, K. (2024a). Effect of fertility levels and liquid biofertilizers on quality parameters of malt barley (*Hordeum vulgare* L.). *Indian Journal of Agronomy*, 69(4), 460–465. <https://doi.org/10.59797/ija.v69i4.5551>
- Athnere, S., Chaplot, P. C., Yadav, P., & Garg, K. (2024b). Effect of fertility levels and liquid biofertilizers on quality parameters of malt barley (*Hordeum vulgare* L.). *Indian Journal of Agronomy*, 69(4), 460–465. <https://doi.org/10.59797/ija.v69i4.5551>
- Bahuguna, A., Sharma, S., Rai, A., Bhardwaj, R., Sahoo, S. K., Pandey, A., & Yadav, B. (2022). Chapter 17—Advance technology for biostimulants in agriculture. In H. B. Singh & A. Vaishnav (Eds.), *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and*

Bioengineering (pp. 393–412). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85581-5.00010-0>

Bello, Z. A., van Rensburg, L. D., Dlamini, P., Tfwala, C. M., & Tesfuhuney, W. (2022). Characterisation and Effects of Different Levels of Water Stress at Different Growth Stages in Malt Barley under Water-Limited Conditions. *Plants*, *11*(5), 578.
<https://doi.org/10.3390/plants11050578>

Bossio, D. A., & Cassman, K. G. (1991a). Traditional Rainfed Barley Production in the Andean Highlands of Ecuador: Soil Nutrient Limitations and Other Constraints. *Mountain Research and Development*, *11*(2), 115–126. <https://doi.org/10.2307/3673571>

Bossio, D. A., & Cassman, K. G. (1991b). Traditional Rainfed Barley Production in the Andean Highlands of Ecuador: Soil Nutrient Limitations and Other Constraints. *Mountain Research and Development*, *11*(2), 115–126. <https://doi.org/10.2307/3673571>

Brueggeman, R. S. (2024). Chapter 22—Barley. In R. P. Oliver (Ed.), *Agrios' Plant Pathology (Sixth Edition)* (pp. 679–684). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822429-8.00022-4>

Campuzano-Duque, L. F., Avendaño-Avendaño, D. F., & Luque-Sanabria, N. Y. (2022). Comportamiento productivo y estabilidad fenotípica de *Hordeum vulgare* L. en Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 44392–44392. <https://doi.org/10.15517/am.v33i1.44392>

Ccente, J. C., Paco, J. L. C., Jurado, R. H., & Antezana, J. L. O. (2021). Sustratos y tiempos de cosecha en el rendimiento del forraje verde

hidropónico de la cebada. *Revista de investigación científica siglo XXI*, 1(2), 63–71. <https://doi.org/10.54943/rcsxxi.v1i1.171>

Chaudhary, A., Chhokar, R. S., & Singh, S. (2022). Integrated Weed Management in Wheat and Barley: Global Perspective. In P. L. Kashyap, V. Gupta, O. Prakash Gupta, R. Sendhil, K. Gopalareddy, P. Jasrotia, & G. P. Singh (Eds.), *New Horizons in Wheat and Barley Research: Crop Protection and Resource Management* (pp. 545–615). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4134-3_20

Cozzolino, E., Di Mola, I., Ottaiano, L., Nocerino, S., Sifola, M. I., El-Nakhel, C., Roupheal, Y., & Mori, M. (2021). Can Seaweed Extract Improve Yield and Quality of Brewing Barley Subjected to Different Levels of Nitrogen Fertilization? *Agronomy*, 11(12), 2481. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122481>

Crisan, I., Valean, A. M., Chețan, F., Tărău, A. D., Călugăr, R., Boanta, E. A., & Muntean, L. (2023). Reconsideration of Barley in Human Food From the Aspect of Digestive Fiber Content. *Hop and Medicinal Plants*, 31(1–2), 110–119. <https://doi.org/10.15835/hpm.v31i1-2.14742>

Dubey, R., & Misra, S. (2025). Biostimulants: An eco-friendly regulator of plant stress tolerance and sustainable solution to future agriculture. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 91(1), 60–67. <https://doi.org/10.1007/s43538-024-00328-4>

- Elsayed, M. M., Dahdouh, S. M., Poraas, M. A., & Elsayy, M. M. (2024). IMPROVING N-FERTILIZATION EFFICIENCY FOR BARLEY PLANT GROWN ON SANDY CALCAREOUS SOIL BY USING ORGANIC AND BIOFERTILIZERS. *Zagazig Journal of Agricultural Research*, 51(1), 55–76. <https://doi.org/10.21608/zjar.2024.346057>
- Falconí, E., Garófalo, J., Ponce, L., Coronel, J., Abad, S., & Rivadeneira, M. (2015a). “INIAP-Palmira 2014”: A new drought-resistance barley variety. *Agronomía Colombiana*, 33(2), 280–284. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n2.49678>
- Falconí, E., Garófalo, J., Ponce, L., Coronel, J., Abad, S., & Rivadeneira, M. (2015b). “INIAP-Palmira 2014”: A new drought-resistance barley variety. *Agronomía Colombiana*, 33(2), 280–284. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n2.49678>
- Fazil, K., Das, T. K., Nath, C. P., Nazir, R., & Samim, M. (2022). Nitrogen and weed management effects on weeds and yield of barley in Kandahar, Afghanistan. *Indian Journal of Weed Science*, 54(3), 309–313.
- Ferion, M., Zouitane, I., Bouhraoua, S., Elouattassi, Y., Belahcen, D., Errabbani, A., Louahia, S., Sayyed, R., & El Ghachtouli, N. (2025). Applying microbial biostimulants and drought-tolerant genotypes to enhance barley growth and yield under drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1494987>

- Fouad, W. A. M., & Fouad, E. A. (2022). Evaluation of antibacterial activity of different *Moringa oleifera* leaf extract on *Streptococcus* mutans: An in-vitro antimicrobial study. *International Journal of Health Sciences*, 6(S5), 7532–7544. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS5.10385>
- Galon, L., Silva, A. M. L. da, Franceschetti, M. B., Müller, C., Weirich, S. N., Toso, J. O., Tonin, R. J., & Perin, G. F. (2023). Selectivity and efficacy of herbicides applied on barley for weed control. *Bragantia*, 82, e20220111. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20220111>
- Geng, L., Li, M., Zhang, G., & Ye, L. (2022). Barley: A potential cereal for producing healthy and functional foods. *Food Quality and Safety*, 6, fyac012. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyac012>
- Goñi, O., Łangowski, Ł., Feeney, E., Quille, P., & O’Connell, S. (2021). Reducing Nitrogen Input in Barley Crops While Maintaining Yields Using an Engineered Biostimulant Derived From *Ascophyllum nodosum* to Enhance Nitrogen Use Efficiency. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.664682>
- Górski, R., Rosa, R., Niewiadomska, A., Wolna-Maruwka, A., Głuchowska, K., & Płaza, A. (2024). The Use of a Composition of Bacterial Consortia and Living Mulch to Reduce Weeds in Organic Spring Barley Cultivation as an Element of Sustainable Plant Production. *Sustainability*, 16(12), 5268. <https://doi.org/10.3390/su16125268>

- Guo, Y., Jayakodi, M., Himmelbach, A., Ben-Yosef, E., Davidovich, U., David, M., Hartmann-Shenkman, A., Kislev, M., Fahima, T., Schuenemann, V. J., Reiter, E., Krause, J., Steffenson, B. J., Stein, N., Weiss, E., & Mascher, M. (2024). *A haplotype-based evolutionary history of barley domestication* (p. 2024.12.18.628695). bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2024.12.18.628695>
- Gutiérrez, L., Berberian, N., Capettini, F., Falcioni, E., Fros, D., Germán, S., Hayes, P. M., Huerta-Espino, J., Herrera, S., Pereyra, S., Pérez, C., Sandoval-Islas, S., Singh, R., & Castro, A. (2013). Genome-Wide Association Mapping Identifies Disease-Resistance QTLs in Barley Germplasm from Latin America. In G. Zhang, C. Li, & X. Liu (Eds.), *Advance in Barley Sciences* (pp. 209–215). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4682-4_18
- Hinojosa, L., Leguizamo, A., Carpio, C., Muñoz, D., Mestanza, C., Ochoa, J., Castillo, C., Murillo, A., Villacrés, E., Monar, C., Pichazaca, N., & Murphy, K. (2021). Quinoa in Ecuador: Recent Advances under Global Expansion. *Plants*, *10*(2), 298. <https://doi.org/10.3390/plants10020298>
- Izydorczyk, M. S., & Edney, M. (2017). Chapter 9 - Barley: Grain-Quality Characteristics and Management of Quality Requirements. In C. Wrigley, I. Batey, & D. Miskelly (Eds.), *Cereal Grains (Second Edition)* (pp. 195–234). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100719-8.00009-7>

- Jiang, C., Kan, J., Gao, G., Dockter, C., Li, C., Wu, W., Yang, P., & Stein, N. (2025a). Barley2035: A decadal vision for barley research and breeding. *Molecular Plant*, 18(2), 195–218. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2024.12.009>
- Jiang, C., Kan, J., Gao, G., Dockter, C., Li, C., Wu, W., Yang, P., & Stein, N. (2025b). Barley2035: A decadal vision for barley research and breeding. *Molecular Plant*, 18(2), 195–218. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2024.12.009>
- Jiang, C., Kan, J., Gao, G., Dockter, C., Li, C., Wu, W., Yang, P., & Stein, N. (2025c). Barley2035: A decadal vision for barley research and breeding. *Molecular Plant*, 18(2), 195–218. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2024.12.009>
- Johnson, R., Joel, J. M., Janeeshma, E., & Puthur, J. T. (2024). Chapter 14—Biostimulants mediated imprints on seed physiology in crop plants. In A. Husen (Ed.), *Biostimulants in Plant Protection and Performance* (pp. 221–236). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15884-1.00026-9>
- Juvale, P. S., & Baum, T. J. (2018). “Cyst-ained” research into Heterodera parasitism. *PLOS Pathogens*, 14(2), e1006791. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1006791>
- Kalee, H. H. H. A., & Raheem, A. H. (2024). SEEDING RATE AND NITROGEN FERTILIZER LEVEL FOR BLACK BARLEY UNDER RAIN-FED CONDITIONS. *Nativa*, 12(1), 172–178. <https://doi.org/10.31413/nat.v12i1.16993>

- Kaur, A., & Kaur, R. (2022). Performance of barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties for growth, yield and yield attributes and malt quality parameters. *INTERNATIONAL JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCES*, *18*(2), 847–855. <https://doi.org/10.15740/HAS/IJAS/18.2/847-855>
- Kaur, A., Purewal, S. S., Phimolsiripol, Y., & Punia Bangar, S. (2024). Unraveling the Hidden Potential of Barley (*Hordeum vulgare*): An Important Review. *Plants*, *13*(17), 2421. <https://doi.org/10.3390/plants13172421>
- Mansour, N. E., El-Sayed, A., Sabra, D. M., Nassar, S. M. A., Bakry, B. A., Abdelraouf, R. E., & Ragab, R. (2023). Water productivity of barley crop under laser land leveling technique and minimum tillage. *Water Science*, *37*(1), 458–471. <https://doi.org/10.1080/23570008.2023.2290936>
- Martin, P., Russell, J., Wishart, J., Brown, L. K., Wallace, M., Iannetta, P. P. M., & George, T. S. (2025). Back to the future: Using ancient Bere barley landraces for a sustainable future. *PLANTS, PEOPLE, PLANET*, *7*(3), 546–561. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10432>
- Martínez-López, J. A., López-Urrea, R., Martínez-Romero, Á., Pardo, J. J., Montero, J., & Domínguez, A. (2022). Sustainable Production of Barley in a Water-Scarce Mediterranean Agroecosystem. *Agronomy*, *12*(6), 1358. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061358>

- McCullough, M. R., & Melander, B. (2022). Improving upon the interrow hoed cereal system: The effects of crop density and row spacing on intrarow weeds and crop parameters in spring barley. *Weed Science*, 70(3), 341–352. <https://doi.org/10.1017/wsc.2022.14>
- Metiku, K. B., & Muluken, G. T. (2024). Demonstrations of Improved Weed Management Options for Malt Barley in Central Ethiopia Region. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 28(9), 2843–2847. <https://doi.org/10.4314/jasem.v28i9.29>
- Mičúchová, A., Kyslík, J., Korytář, T., Piačková, V., & Frébort, I. (2024). Barley as a production platform for oral vaccines in sustainable fish aquaculture. *New Biotechnology*, 84, 37–52. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2024.09.004>
- Murillo, A., Zambrano, J. L., Pereira-Lorenzo, S., Torres, A., & Murillo, A. (2023). *Lupinus mutabilis* Breeding in the Andes of Ecuador, Peru, and Bolivia: A Review (No. 2023100243). Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202310.0243.v1>
- Naeem, M., Farooq, S., & Hussain, M. (2022). The Impact of Different Weed Management Systems on Weed Flora and Dry Biomass Production of Barley Grown under Various Barley-Based Cropping Systems. *Plants*, 11(6), 718. <https://doi.org/10.3390/plants11060718>
- Newton, A. C., Flavell, A. J., George, T. S., Leat, P., Mullholland, B., Ramsay, L., Revoredo-Giha, C., Russell, J., Steffenson, B. J.,

Swanston, J. S., Thomas, W. T. B., Waugh, R., White, P. J., & Bingham, I. J. (2011a). Crops that feed the world 4. Barley: A resilient crop? Strengths and weaknesses in the context of food security. *Food Security*, 3(2), 141–178. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0126-3>

Newton, A. C., Flavell, A. J., George, T. S., Leat, P., Mullholland, B., Ramsay, L., Revoredo-Giha, C., Russell, J., Steffenson, B. J., Swanston, J. S., Thomas, W. T. B., Waugh, R., White, P. J., & Bingham, I. J. (2011b). Crops that feed the world 4. Barley: A resilient crop? Strengths and weaknesses in the context of food security. *Food Security*, 3(2), 141–178. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0126-3>

Pallo Toapanta, M. C. (2022). *Evaluación del comportamiento agronómico de líneas promisorias de cebada desnuda (Hordeum vulgare L.), del INIAP bajo las condiciones agroecológicas en el Campus Salache de la Universidad Técnica de Cotopaxi, 2021-2022*. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/9468>

Pazuña Mayorga, J. M. (2025). *Determinación de grados días desarrollo en los cultivos de cereales en el proyecto INIAP-UTC*. [Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)]. <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/123456789/14510>

Ramírez, C. Ll., Ramos, K. M., Bazurto, J. E., & Ontaneda, M. de los Á. C. (2024). Influencia de la malta de quinua y amaranto en la calidad de la cerveza artesanal. *Investigación, Tecnología e Innovación*, 16(22), 31–42. <https://doi.org/10.53591/iti.v16i22.1868>

- Ravelo, A., Planchuelo-Ravelo, A., & Hodges, T. (1988). The Effects of Climatic Variations and Agricultural Practices on Barley Yields. In M. L. Parry, T. R. Carter, & N. T. Konijn (Eds.), *The Impact of Climatic Variations on Agriculture* (pp. 429–442). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2965-4_19
- Serna Illicachi, N. J. (2025). *Evaluación de la tolerancia a la sequía en 15 variedades de cebada (hordeum vulgare l.) liberadas del INIAP bajo condiciones de invernadero, 2024*. [Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)]. <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/123456789/14505>
- Shekhawat, P. S., Singh, S. P., & Bishnoi, S. (2022). Integrated Management of Barley Diseases: Current Status and Future Research Priorities. In P. L. Kashyap, V. Gupta, O. Prakash Gupta, R. Sendhil, K. Gopalareddy, P. Jasrotia, & G. P. Singh (Eds.), *New Horizons in Wheat and Barley Research: Crop Protection and Resource Management* (pp. 215–260). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4134-3_7
- Shilev, S., Mitkov, A., Popova, V., Neykova, I., Minev, N., Szulc, W., Yordanov, Y., & Yanev, M. (2024). Fertilization Type Differentially Affects Barley Grain Yield and Nutrient Content, Soil and Microbial Properties. *Microorganisms*, 12(7), 1447. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12071447>
- Tahir, N. A., Lateef, D. D., Mustafa, K. M., & Rasul, K. S. (2022). Under Natural Field Conditions, Exogenous Application of Moringa Organ Water Extract Enhanced the Growth- and Yield-Related

Traits of Barley Accessions. *Agriculture*, 12(9), 1502.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12091502>

Tarafdar, J. C. (2022). Chapter 15—Biostimulants for sustainable crop production. In H. B. Singh & A. Vaishnav (Eds.), *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 299–313). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85579-2.00004-6>

Tercero Guaman, L. O. (2024). “*Evaluación de comportamiento agronómico de una variedad de cebada desnuda (Hordeum vulgare L.) INIAP y cuatro líneas promisorias INIAP en el Campus Salache de la Universidad Técnica de Cotopaxi, 2023-2024*” [Ecuador : Latacunga : Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)]. <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/123456789/12476>

Thomé, R., Amabile, R., Malaquias, J., Souza, N., Santos, G., Melo, J., Fialho, A., & Santos, M. (2024). Adaptability and Stability of Irrigated Barley Genotypes in the Cerrado of the Federal District. *Agriculture*, 14(10), 1776.
<https://doi.org/10.3390/agriculture14101776>

Tigasi Caisaguano, T. S. (2024). “*Evaluación del comportamiento agronómico de una variedad de cebada dística (Hordeum vulgare L.) INIAP y cuatro líneas promisorias INIAP en el Campus Salache de la Universidad Técnica de Cotopaxi, 2023 – 2024*” [Ecuador : Latacunga : Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)]. <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/123456789/12459>

- Tyagi, V., Jacob, S. R., Gupta, K., & Brahmi, P. (2020). Status of introduction and conservation in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Cereal Research*, *12*(1). <https://doi.org/10.25174/2582-2675/2020/83213>
- UnNisa, Z., Govind, A., Marchetti, M., & Lasserre, B. (2022). A review of crop water productivity in the Mediterranean basin under a changing climate: Wheat and barley as test cases. *Irrigation and Drainage*, *71*(S1), 51–70. <https://doi.org/10.1002/ird.2710>
- Vahamidis, P., Stefopoulou, A., & Kotoulas, V. (2023). Optimizing Sustainability in Malting Barley: A Practical Approach to Nitrogen Management for Enhanced Environmental, Agronomic, and Economic Benefits. *Agriculture*, *13*(12), 2272. <https://doi.org/10.3390/agriculture13122272>
- Vega-Domínguez, A., Quintero-Lira, J., & Espitia-López, A. (2024, October 3). *Principales hongos y micotoxinas presentes en la cebada (Hordeum vulgare)*. <https://socmextih.com/vega-dominguez-et-al-2024/>
- Verma, R. P. S. (2018). Barley: Global challenges and perspectives under non-tropical dry areas. *Journal of Cereal Research*, *10*(3). <https://doi.org/10.25174/b3bttq38>
- Verstegen, H., Köneke, O., Korzun, V., & von Broock, R. (2014). The World Importance of Barley and Challenges to Further Improvements. In J. Kumlehn & N. Stein (Eds.), *Biotechnological*

Approaches to Barley Improvement (pp. 3–19). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-44406-1_1

Vicente Jiménez, J., Videgain Marco, M., & Nocito Pérez, J. (with Universidad de Zaragoza, & Aibar Lete, J.). (2021). *Evaluación del efecto de diferentes tratamientos fungicidas sobre varios parámetros productivos de un cultivo de cebada (Hordeum vulgare L.) ubicado en Zuera (Zaragoza)*. Universidad de Zaragoza.

Villacrés, E., Campaña, D., Garófalo, J., Falconi, E., Quelal, M., Matanguihan, J., & Murphy, K. (2019). Evaluation of β -glucan content, viscosity, soluble dietary fiber and processing effect in grains of Ecuadorian barley genotypes. *Agronomía Colombiana*, 37(3), 323–330.
<https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v37n3.77101>

Wacławowicz, R., Giemza, M., Pytlarz, E., & Wenda-Piesik, A. (2023). The Impact of Cultivation Systems on Weed Suppression and the Canopy Architecture of Spring Barley. *Agriculture*, 13(9), 1747.
<https://doi.org/10.3390/agriculture13091747>



Cultivo de cebada (*hordeum vulgare* L.): fundamentos agronómicos y tecnologías para la producción sostenible, se publicó en el mes de diciembre de 2025.

ISBN: 978-9907-0-0543-1

**Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
[https://grupobl.com/
publicaciones@grupobl.com](https://grupobl.com/publicaciones@grupobl.com)**

BIOGRAFÍA DE LOS AUTORES

Stefani Vanesa Vega Reinel:

Ingeniera Agrónoma y Magíster en Agronomía con doble mención en Sanidad Vegetal y Agroecología. Posee diplomados en Biotecnología Vegetal y Biología Molecular. Actualmente cursa un Doctorado en Ciencias Agropecuarias. Su especialización se centra en cultivos in vitro y biotecnología vegetal, aplicando microorganismos benéficos para productividad sostenible.

David Rodrigo Silva García:

Ingeniero Agrónomo, Magíster en Gerencia de Empresas Agropecuarias y Salud con enfoque de ecosistemas. Posee experiencia en la producción de semillas y manejo de sistemas de producción de cereales, leguminosas y granos andinos, así como en procesos de agricultura de conservación. Coordinador de la Unidad de Integración Curricular durante 10 años, Responsable del Programa semillas UEB y Coordinador del proyecto UEB-FIASA.

Sonia Del Carmen Fierro Borja:

Magíster en Producción Agrícola Sustentable, Especialista en Economía Agrícola, Docente titular de la Universidad Estatal de Bolívar. Autora y coautora de proyectos de investigación. Participación en proyectos de investigación y vinculación. Directora de Trabajos de Investigación (tesis de pregrado) y como Miembro de Tesis de postgrado. Publicaciones de proyectos investigativos.

Nelson Arturo Monar Gavilanez:

Ingeniero Agrónomo, Máster en Gerencia Educativa y Diplomado Superior en Gestión y Planificación Educativa. Docente titular. Obras relevantes: Libro Valoración Económica de los bienes y servicios ambientales. Participación en investigaciones realizadas en la Universidad Estatal de Bolívar, publicaciones de artículos científicos y publicación de un libro.

CULTIVO DE CEBADA (*Hordeum vulgare* L.): FUNDAMENTOS AGRONÓMICOS Y TECNOLOGÍAS PARA LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE

Estimado lector, este libro es una guía técnica y académica que aborda el cultivo de la cebada como un recurso estratégico para la seguridad alimentaria y la industria en la región andina.

El texto analiza la brecha productiva existente en países como Ecuador y propone soluciones basadas en la innovación tecnológica, el mejoramiento genético y el uso de bioestimulantes para incrementar el rendimiento agrícola. Con un enfoque que equilibra la teoría científica y la aplicación práctica, la obra busca formar a profesionales de la agronomía capaces de transformar los sistemas tradicionales en modelos de producción sostenibles y eficientes, preparados para los desafíos del cambio climático.

Agradecemos a todos los lectores que se acercan a esta obra con ánimo de aprender, aplicar y transformar.



Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
[https://grupobl.com/
publicaciones@grupobl.com](https://grupobl.com/publicaciones@grupobl.com)

ISBN: 978-9907-0-0543-1

