



**UNAAT**

EXCELENCIA CIENTÍFICA Y ACADÉMICA  
CON RESPONSABILIDAD SOCIAL

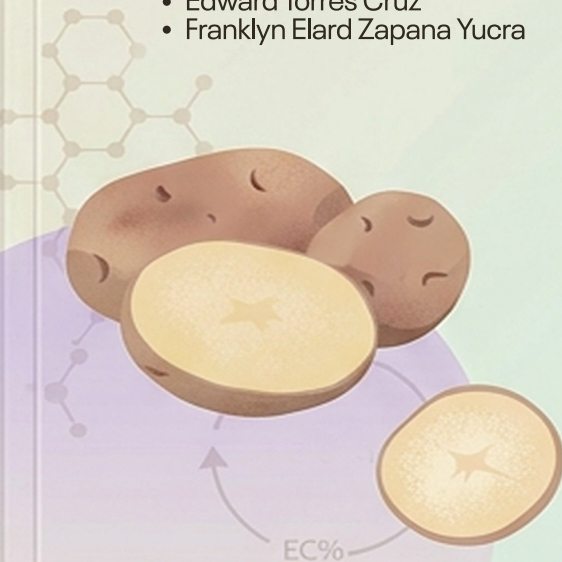
Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma

# Raíces Reservantes, Tubérculos Andinos y Almidones

Bases Biológicas, Tecnológicas y Sostenibles

## **Autores:**

- Roenfi Guerra Lima
- Nury Yaneth Mayta Barrios
- Edward Torres Cruz
- Franklyn Elard Zapana Yucra

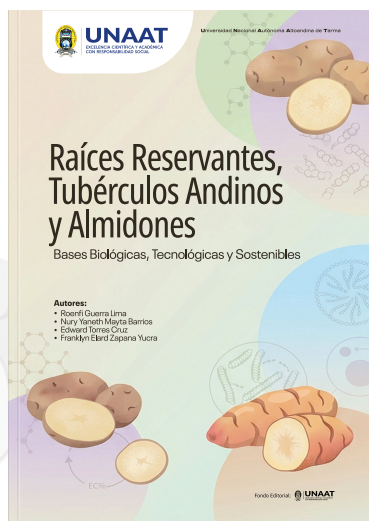


Fondo Editorial:



**UNAAT**  
EXCELENCIA CIENTÍFICA Y ACADÉMICA  
CON RESPONSABILIDAD SOCIAL





## **Raíces Reservantes, Tubérculos Andinos y Almidones Bases Biológicas, Tecnológicas y Sostenibles**

Roenfi Guerra Lima  
Nury Yaneth Mayta Barrios  
Edward Torres Cruz  
Franklyn Elard Zapana Yucra

**Roenfi Guerra Lima / Nury Yaneth Mayta Barrios / Edward Torres Cruz /  
Franklyn Elard Zapana Yucra**

216 pp.; 17x24cm

Raíces Reservantes, Tubérculos Andinos y Almidones Bases Biológicas,  
Tecnológicas y Sostenibles

**Editado por:**

©Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma, Vicepresidencia  
de Investigación - Fondo Editorial. Carretera La Florida - Cochayoc Km2,  
Huancucro N° 2092, Acobamba, Tarma - Junín, Perú.

**ISBN:** 978-612-99147-7-0

1° Edición digital

Abril, 2026

Hecho en Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2026-03668

**Proceso de revisión**

Revisado por pares externos, modalidad doble ciego

**Revisor A:** Ronald Astete Tebes 

**Revisor B:** Wilson Manuel Castro Silupo 

**Diseño de cubierta y maquetación de interiores:**

Alfredo Carhuancho Fabián

Oficina de Comunicación e Imagen Institucional

Publicado en el Perú / Published in Peru

Todos los derechos reservados. Prohibida la reproducción total o parcial de  
esta obra, sin autorización escrita del autor.



## Autores

### **Roenfi Guerra Lima**

Ingeniero Agroindustrial, Escuela Profesional de  
Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional  
del Altiplano, Puno, Perú.

Correo electrónico: rguerra@unap.edu.pe

### **Nury Yaneth Mayta Barrios**

Ingeniera Agroindustrial, Escuela Profesional de  
Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional  
del Altiplano, Puno, Perú.\

Correo electrónico: nmayta@unap.edu.pe

### **Edward Torres Cruz**

Ingeniero Agroindustrial, Escuela Profesional de  
Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional  
del Altiplano, Puno, Perú.\

Correo electrónico: etorres@unap.edu.pe

### **Franklyn Elard Zapana Yucra**

Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial\\  
Universidad Nacional del Altiplano\\

Av. Sesquicentenario 1150\\

Puno, Perú



# Prólogo

Los Andes constituyen uno de los centros de domesticación más importantes del mundo, albergando una extraordinaria diversidad de cultivos que han sustentado a las civilizaciones precolombinas durante milenios. Entre estos recursos fitogenéticos, las raíces reservantes y los tubérculos andinos representan un patrimonio biológico, cultural y alimentario de valor incalculable para la humanidad. La papa (*Solanum tuberosum*), la oca (*Oxalis tuberosa*), el olluco (*Ullucus tuberosus*), la mashua (*Tropaeolum tuberosum*), la maca (*Lepidium meyenii*), el yacón (*Smallanthus sonchifolius*) y la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*), entre otros, no solo han sido la base de la seguridad alimentaria andina, sino que actualmente emergen como alternativas estratégicas frente a los desafíos globales de cambio climático, malnutrición y sostenibilidad agrícola.

El presente libro nace de la necesidad de consolidar el conocimiento científico sobre estos cultivos desde una perspectiva integral que abarque sus fundamentos biológicos, su potencial tecnológico y su rol en sistemas agroindustriales sostenibles. La región andina, y particularmente el altiplano peruano, posee condiciones agroecológicas únicas que han permitido la evolución y conservación de germoplasma con características excepcionales de adaptación a estreses abióticos, resistencia a plagas y enfermedades, y composición nutricional destacada.

Desde la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional del Altiplano, hemos asumido el compromiso de contribuir al rescate, valoración y aprovechamiento sostenible de estos recursos genéticos. Este texto representa el esfuerzo de sistematizar conocimientos provenientes de diversas disciplinas: botánica, fisiología

vegetal, genética, bioquímica, tecnología de alimentos y gestión ambiental, con el objetivo de proporcionar una herramienta académica rigurosa para estudiantes, investigadores y profesionales del sector agroindustrial.

La obra se estructura en siete capítulos que abordan desde los aspectos morfofisiológicos de raíces reservantes y tubérculos, pasando por la biodiversidad genética del género *Solanum*, la caracterización y extracción de almidones, los procesos tecnológicos aplicables, hasta los compuestos bioactivos y las estrategias de sostenibilidad en la cadena agroindustrial andina. Cada capítulo ha sido desarrollado con rigor científico, sustentado en literatura actualizada y con énfasis en la aplicabilidad de los conocimientos a la realidad del sector agroindustrial peruano.

Esperamos que este libro contribuya a la formación de nuevas generaciones de profesionales comprometidos con la valoración de la agrobiodiversidad andina y su transformación sostenible, así como al fortalecimiento de la investigación y desarrollo tecnológico que permita posicionar a estos cultivos en mercados nacionales e internacionales, manteniendo siempre el respeto por los conocimientos ancestrales y la sostenibilidad de los sistemas productivos.

Los autores\\

Puno, 2026

## Resumen

Las raíces reservantes y tubérculos andinos constituyen recursos fitogenéticos estratégicos que han sustentado la seguridad alimentaria en la región andina durante más de 8000 años. Este libro presenta una revisión integral y actualizada sobre las bases biológicas, tecnológicas y de sostenibilidad asociadas a estos cultivos y sus derivados, con especial énfasis en los almidones nativos. La obra analiza la morfofisiología de raíces reservantes, destacando los mecanismos de acumulación de carbohidratos de reserva, las adaptaciones anatómicas al estrés abiótico característico del altiplano, y los procesos de tuberización regulados por factores ambientales y genéticos. Se examina la biodiversidad del género *Solanum*, organizando las especies silvestres y cultivadas según sus niveles de ploidía (diploides, triploides, tetraploides y pentaploides), y se discuten las implicaciones evolutivas y agronómicas de esta variabilidad genética.

El texto profundiza en la caracterización fisicoquímica de almidones extraídos de papa, oca, mashua, olluco, maca y arracacha, analizando propiedades como el tamaño y morfología granular, el contenido de amilosa/amilopectina, las temperaturas de gelatinización, y el comportamiento reológico. Se presentan metodologías de extracción optimizadas y se discuten los factores que afectan el rendimiento industrial. Los procesos tecnológicos aplicables a estos cultivos, incluyendo deshidratación, fermentación, extrusión y modificación química de almidones, son abordados desde una perspectiva de agregación de valor y desarrollo de productos funcionales.

La presencia de compuestos bioactivos (polifenoles, antocianinas, glucosinolatos, fructooligosacáridos) confiere a estos tubérculos y

raíces un valor nutracéutico significativo, con potencial aplicación en alimentos funcionales y farmacéutica natural. Finalmente, se analizan estrategias de sostenibilidad en la cadena agroindustrial andina, considerando aspectos de huella hídrica, huella de carbono, economía circular, y sistemas de certificación que garanticen la conservación de la agrobiodiversidad y el bienestar de las comunidades productoras. Este libro constituye una contribución académica relevante para estudiantes e investigadores en ingeniería agroindustrial, ciencia de alimentos, botánica aplicada y desarrollo rural sostenible.

**Palabras clave:** Tubérculos andinos, raíces reservantes, almidones nativos, biodiversidad de *Solanum*, compuestos bioactivos, agroindustria sostenible, altiplano peruano.



# Abstract

Andean storage roots and tubers constitute strategic plant genetic resources that have sustained food security in the Andean region for more than 8000 years. This book presents a comprehensive and updated review of the biological, technological, and sustainability foundations associated with these crops and their derivatives, with special emphasis on native starches. The work analyzes the morphophysiology of storage roots, highlighting carbohydrate accumulation mechanisms, anatomical adaptations to abiotic stress characteristic of the altiplano, and tuberization processes regulated by environmental and genetic factors. The biodiversity of the genus *Solanum* is examined, organizing wild and cultivated species according to their ploidy levels (diploid, triploid, tetraploid, and pentaploid), and discussing the evolutionary and agronomic implications of this genetic variability.

The text delves into the physicochemical characterization of starches extracted from potato, oca, mashua, ulluco, maca, and arracacha, analyzing properties such as granule size and morphology, amylose/amylopectin content, gelatinization temperatures, and rheological behavior. Optimized extraction methodologies are presented, and factors affecting industrial yield are discussed. Technological processes applicable to these crops, including dehydration, fermentation, extrusion, and chemical modification of starches, are addressed from a value-addition and functional product development perspective.

The presence of bioactive compounds (polyphenols, anthocyanins, glucosinolates, fructooligosaccharides) confers significant nutraceutical value to these tubers and roots, with potential application

in functional foods and natural pharmaceuticals. Finally, sustainability strategies in the Andean agroindustrial chain are analyzed, considering aspects of water footprint, carbon footprint, circular economy, and certification systems that guarantee the conservation of agrobiodiversity and the welfare of producer communities. This book constitutes a relevant academic contribution for students and researchers in agroindustrial engineering, food science, applied botany, and sustainable rural development.

**Keywords:** Andean tubers, storage roots, native starches, *Solanum* biodiversity, bioactive compounds, sustainable agroindustry, Peruvian altiplano.

# Contenido

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Introducción General                                                      | 19        |
| <b>Capítulo I</b>                                                         | <b>23</b> |
| 1.1. Introducción a las Raíces Reservantes                                | 23        |
| 1.2. Origen y Desarrollo Ontogénico de Raíces Reservantes                 | 24        |
| 1.2.1. Desarrollo Embriológico y Diferenciación Inicial                   | 24        |
| 1.2.2. Proliferación Celular y Expansión                                  | 25        |
| 1.3. Anatomía de Raíces Reservantes                                       | 26        |
| 1.3.1. Organización Tisular General                                       | 26        |
| 1.3.2. Características Citológicas del Parénquima de Almacenamiento       | 27        |
| 1.3.3. Sistema Vascular y Distribución de Fotoasimilados                  | 28        |
| 1.4. Fisiología de la Acumulación de Reservas                             | 29        |
| 1.4.1. Partición de Fotoasimilados                                        | 29        |
| 1.4.2. Metabolismo de Carbohidratos en Raíces Reservantes                 | 30        |
| 1.4.3. Regulación Hormonal del Desarrollo de Raíces Reservantes           | 31        |
| 1.5. Adaptaciones Morfofisiológicas a Condiciones del Altiplano           | 32        |
| 1.5.1. Tolerancia a Estrés por Baja Temperatura                           | 32        |
| 1.5.2. Respuestas a Estrés Hídrico                                        | 33        |
| 1.5.3. Eficiencia en la Adquisición de Nutrientes                         | 34        |
| 1.6. Casos Particulares de Raíces Reservantes Andinas                     | 35        |
| 1.6.1. Maca ( <i>Lepidium meyenii</i> )                                   | 35        |
| 1.6.2. Yacón ( <i>Smallanthus sonchifolius</i> )                          | 36        |
| 1.6.3. Arracacha ( <i>Arracacia xanthorrhiza</i> )                        | 37        |
| 1.7. Consideraciones Agronómicas para Optimización del Desarrollo Radical | 38        |
| <b>Capítulo II</b>                                                        | <b>41</b> |
| 2.1. Introducción a los Tubérculos                                        | 41        |
| 2.2. Proceso de Tuberización                                              | 42        |
| 2.2.1. Definición y Etapas de la Tuberización                             | 42        |
| 2.2.2. Regulación Ambiental de la Tuberización                            | 43        |
| 2.2.3. Regulación Hormonal del Proceso de Tuberización                    | 45        |
| 2.3. Anatomía de Tubérculos                                               | 46        |
| 2.3.1. Organización Tisular General                                       | 46        |
| 2.3.2. Características de las Yemas y Ojos                                | 47        |

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.3. Parénquima de Almacenamiento: Estructura y Composición  | 48        |
| 2.3.4. Peridermis y Capas Protectoras                          | 49        |
| 2.4. Fisiología del Crecimiento y Desarrollo de Tubérculos     | 50        |
| 2.4.1. Partición de Fotoasimilados hacia Tubérculos            | 50        |
| 2.4.2. Metabolismo de Carbohidratos en Tubérculos              | 51        |
| 2.4.3. Respiración y Balance Energético                        | 53        |
| 2.5. Dormancia y Brotación de Tubérculos                       | 54        |
| 2.5.1. Fases de la Dormancia                                   | 54        |
| 2.5.2. Proceso de Brotación                                    | 55        |
| 2.6. Tubérculos Andinos: Características Particulares          | 56        |
| 2.6.1. Oca ( <i>Oxalis tuberosa</i> )                          | 56        |
| 2.6.2. Olluco ( <i>Ullucus tuberosus</i> )                     | 57        |
| 2.6.3. Mashua ( <i>Tropaeolum tuberosum</i> )                  | 58        |
| 2.7. Consideraciones Agronómicas para Producción de Tubérculos | 59        |
| <b>Capítulo III</b>                                            | <b>61</b> |
| 3.1. Introducción al Género <i>Solanum</i>                     | 61        |
| 3.2. Taxonomía y Clasificación de <i>Solanum</i> Tuberífero    | 62        |
| 3.2.1. Historia de la Clasificación Taxonómica                 | 62        |
| 3.2.2. Nomenclatura de Especies Cultivadas                     | 63        |
| 3.3. Complejidad Ploídica en <i>Solanum</i>                    | 65        |
| 3.3.1. Series Poliploides y Evolución del Genoma               | 65        |
| 3.3.2. Citogenética y Apareamiento Cromosómico                 | 66        |
| 3.4. Especies Diploides ( $2n=2x=24$ )                         | 67        |
| 3.4.1. Especies Diploides Cultivadas                           | 67        |
| 3.4.2. Especies Diploides Silvestres Relevantes                | 69        |
| 3.5. Especies Tetraploides ( $2n=4x=48$ )                      | 71        |
| 3.5.1. <i>Solanum tuberosum</i> subsp. <i>andigena</i>         | 72        |
| 3.5.2. <i>Solanum tuberosum</i> subsp. <i>Tuberosum</i>        | 73        |
| 3.5.3. Especies Tetraploides Silvestres                        | 74        |
| 3.6. Especies Triploides ( $2n=3x=36$ )                        | 75        |
| 3.6.1. <i>Solanum juzepczukii</i>                              | 75        |
| 3.7. Especies Pentaploides ( $2n=5x=60$ )                      | 76        |
| 3.7.1. <i>Solanum curtilobum</i>                               | 76        |
| 3.8. Conservación de Recursos Genéticos                        | 77        |
| 3.8.1. Importancia de la Conservación                          | 77        |
| 3.8.2. Estrategias de Conservación Ex Situ                     | 78        |
| 3.8.3. Conservación In Situ y On Farm                          | 79        |
| 3.8.4. Caracterización y Documentación                         | 80        |
| 3.9. Implicaciones para el Mejoramiento Genético               | 81        |
| <b>Capítulo IV</b>                                             | <b>83</b> |
| 4.1. Introducción a los Almidones Nativos                      | 83        |

|                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2. Estructura y Composición del Almidón                        | 84         |
| 4.2.1. Composición Molecular: Amilosa y Amilopectina             | 84         |
| 4.2.2. Organización Granular del Almidón                         | 86         |
| 4.2.3. Componentes Menores del Almidón                           | 87         |
| 4.3. Métodos de Caracterización de Almidones                     | 88         |
| 4.3.1. Morfología y Tamaño Granular                              | 88         |
| 4.3.2. Contenido de Amilosa                                      | 89         |
| 4.3.3. Propiedades Térmicas: Calorimetría Diferencial de Barrido | 91         |
| 4.3.4. Propiedades de Pasta: Viscografía                         | 92         |
| 4.3.5. Propiedades Reológicas de Pastas y Geles                  | 93         |
| 4.4. Extracción de Almidón: Fundamentos y Metodologías           | 95         |
| 4.4.1. Principios de la Extracción de Almidón                    | 95         |
| 4.4.2. Métodos de Extracción a Escala Laboratorio                | 96         |
| 4.4.3. Extracción Industrial de Almidón de Papa                  | 98         |
| 4.4.4. Extracción de Almidón de Otros Tubérculos Andinos         | 100        |
| 4.5. Factores que Afectan el Rendimiento de Extracción           | 101        |
| 4.5.1. Factores Relacionados con la Materia Prima                | 101        |
| 4.5.2. Factores del Proceso de Extracción                        | 102        |
| 4.6. Propiedades Funcionales de Almidones de Tubérculos Andinos  | 103        |
| 4.6.1. Almidón de Papa                                           | 103        |
| 4.6.2. Almidón de Oca                                            | 105        |
| 4.6.2. Almidón de Olluco                                         | 106        |
| 4.6.4. Almidón de Mashua                                         | 107        |
| 4.7. Modificación de Almidones para Aplicaciones Especializadas  | 107        |
| 4.7.1. Modificaciones Físicas                                    | 108        |
| 4.7.2. Modificaciones Químicas                                   | 108        |
| 4.7.3. Modificaciones Enzimáticas                                | 109        |
| <b>Capítulo V</b>                                                | <b>111</b> |
| 5.1. Introducción a la Transformación Agroindustrial             | 111        |
| 5.2. Procesamiento Tradicional Andino                            | 112        |
| 5.2.1. Producción de Chuño Negro                                 | 112        |
| 5.2.2. Producción de Tunta (Chuño Blanco)                        | 114        |
| 5.2.3. Papa Seca (Choqollo)                                      | 115        |
| 5.3. Deshidratación Moderna                                      | 116        |
| 5.3.1. Fundamentos de la Deshidratación                          | 116        |
| 5.3.2. Secado por Aire Caliente                                  | 118        |
| 5.3.3. Liofilización                                             | 120        |
| 5.3.4. Secado Osmótico                                           | 122        |
| 5.4. Procesos Térmicos                                           | 123        |
| 5.4.1. Cocción y Escaldado                                       | 123        |
| 5.4.2. Esterilización y Pasteurización                           | 125        |

|                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.5. Fermentación                                                  | 127        |
| 5.5.1. Fermentación Láctica                                        | 127        |
| 5.5.2. Fermentación Alcohólica                                     | 128        |
| 5.6. Extrusión                                                     | 130        |
| 5.6.1. Fundamentos del Proceso de Extrusión                        | 130        |
| 5.6.2. Parámetros de Proceso y Efectos sobre Calidad               | 131        |
| 5.6.3. Productos Extruidos de Tubérculos Andinos                   | 132        |
| 5.7. Modificación de Almidones                                     | 134        |
| 5.7.1. Modificación Física                                         | 134        |
| 5.7.2. Modificación Química                                        | 136        |
| 5.7.3. Producción de Almidones Resistentes                         | 137        |
| <b>Capítulo VI</b>                                                 | <b>141</b> |
| 6.1. Introducción a Compuestos Bioactivos en Tubérculos Andinos    | 141        |
| 6.2. Compuestos Fenólicos                                          | 142        |
| 6.2.1. Estructura Química y Clasificación                          | 142        |
| 6.2.2. Contenido en Tubérculos Andinos                             | 143        |
| 6.2.3. Actividad Antioxidante                                      | 145        |
| 6.2.4. Efectos sobre la Salud Humana                               | 147        |
| 6.3. Carotenoides                                                  | 149        |
| 6.3.1. Estructura y Tipos                                          | 149        |
| 6.3.2. Contenido en Variedades Andinas                             | 150        |
| 6.3.3. Actividad Biológica y Beneficios para la Salud              | 151        |
| 6.4. Glucosinolatos                                                | 153        |
| 6.4.1. Estructura Química y Distribución                           | 153        |
| 6.4.2. Glucosinolatos en Mashua                                    | 154        |
| 6.4.3. Actividades Biológicas                                      | 155        |
| 6.5. Fructooligosacáridos                                          | 157        |
| 6.5.1. Estructura y Propiedades                                    | 157        |
| 6.5.2. Yacón como Fuente de FOS                                    | 157        |
| 6.5.3. Efectos Prebióticos y Beneficios para la Salud              | 158        |
| 6.6. Compuestos Bioactivos Adicionales                             | 161        |
| 6.6.1. Alcaloides y Glicoalcaloides                                | 161        |
| 6.6.2. Macamidas y Macaenos                                        | 162        |
| 6.7. Extracción y Cuantificación de Compuestos Bioactivos          | 163        |
| 6.7.1. Métodos de Extracción                                       | 163        |
| 6.7.2. Métodos de Cuantificación                                   | 165        |
| 6.8. Estabilidad y Retención durante Procesamiento                 | 167        |
| <b>Capítulo VII</b>                                                | <b>171</b> |
| 7.1. Introducción a la Sostenibilidad en Sistemas Agroindustriales | 171        |
| 7.2. Huella Hídrica en Sistemas de Producción de Tubérculos        | 172        |
| 7.2.1. Conceptos y Metodología                                     | 172        |

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| 7.2.2. Huella Hídrica de Papa y Tubérculos Andinos       | 174 |
| 7.2.3. Estrategias para Reducción de Huella Hídrica      | 175 |
| 7.3. Huella de Carbono y Mitigación de Emisiones         | 178 |
| 7.3.1. Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono     | 178 |
| 7.3.2. Fuentes de Emisiones en Producción de Papa        | 179 |
| 7.3.3. Estrategias de Mitigación                         | 181 |
| 7.4. Economía Circular y Gestión de Residuos             | 184 |
| 7.4.1. Principios de Economía Circular                   | 184 |
| 7.4.2. Residuos en Procesamiento de Papa                 | 184 |
| 7.4.3. Estrategias de Valorización                       | 186 |
| 7.5. Conservación de Agrobiodiversidad                   | 190 |
| 7.5.1. Importancia de la Agrobiodiversidad Andina        | 190 |
| 7.5.2. Amenazas a la Agrobiodiversidad                   | 191 |
| 7.6.3. Estrategias de Conservación                       | 192 |
| 7.6. Sistemas de Certificación y Etiquetado              | 194 |
| 7.6.1. Certificación Orgánica                            | 194 |
| 7.6.2. Comercio Justo (Fairtrade)                        | 196 |
| 7.6.3. Denominación de Origen e Indicaciones Geográficas | 197 |
| 7.7. Perspectivas Futuras                                | 198 |
| Referencias                                              | 201 |
| Nota sobre las Referencias Bibliográficas                | 211 |
| Epílogo                                                  | 213 |





## Introducción General

### Contexto y relevancia de los cultivos andinos

Los Andes sudamericanos constituyen uno de los ocho centros de origen y domesticación de plantas cultivadas identificados por Vavilov en el siglo XX, (Hawkes, 1990). Esta región montañosa, que se extiende por más de 7000 kilómetros desde Venezuela hasta la Patagonia, alberga una extraordinaria diversidad de ecosistemas y microclimas que han favorecido la evolución y domesticación de numerosas especies de importancia alimentaria mundial. Entre estos recursos fitogenéticos, las raíces reservantes y tubérculos andinos representan un legado ancestral de valor estratégico para la seguridad alimentaria global, la conservación de la agrobiodiversidad y el desarrollo de sistemas agroindustriales sostenibles, (Zimmerer, 2003).

La domesticación de cultivos andinos como la papa (*Solanum tuberosum*), iniciada hace aproximadamente 8000 años en la región del lago Titicaca (Spooner, 2005), marca uno de los hitos más significativos en la historia de la agricultura mundial. Este proceso de selección artificial condujo a la generación de miles de variedades adaptadas a condiciones ambientales extremas, caracterizadas por amplias fluctuaciones térmicas diarias, intensa radiación ultravioleta, limitada disponibilidad hídrica y suelos con restricciones nutricionales. Además de la papa, otros tubérculos como la oca (*Oxalis tuberosa*), el olluco (*Ullucus tuberosus*), la mashua (*Tropaeolum tuberosum*), y raíces reservantes como la maca (*Lepidium meyenii*), el yacón (*Smallanthus sonchifolius*) y la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*), conforman un complejo sistema de cultivos que ha garantizado la subsistencia de poblaciones altoandinas durante milenios (NRC, 1989).

### Problemática Actual y Desafíos

A pesar de su importancia histórica y su potencial nutricional, tecnológico y económico, los tubérculos y raíces andinas enfrentan diversos de-

saños en el contexto contemporáneo. La erosión genética causada por la sustitución de variedades nativas por cultivares modernos, el cambio climático que altera los patrones de cultivo tradicionales, la migración rural-urbana que disminuye el conocimiento tradicional asociado, y la limitada investigación científica y desarrollo tecnológico aplicado a estos cultivos, constituyen amenazas significativas para su conservación y aprovechamiento sostenible (Brush, 2004).

Desde la perspectiva agroindustrial, existe una brecha considerable entre el potencial de estos recursos y su efectiva valorización en cadenas productivas que generen ingresos dignos para los agricultores y productos competitivos para el mercado. La falta de caracterización fisicoquímica exhaustiva de variedades nativas, el desconocimiento de parámetros óptimos de procesamiento, la ausencia de tecnologías apropiadas para la escala de producción campesina, y las limitaciones en la comercialización, constituyen barreras que requieren ser abordadas mediante investigación aplicada y transferencia tecnológica efectiva (Monteros, 2005).

## **Oportunidades en el Contexto Global**

Paradójicamente, el contexto global actual presenta oportunidades sin precedentes para la revalorización de estos cultivos. La creciente demanda de alimentos nutritivos, funcionales y producidos de manera sostenible, el interés por ingredientes naturales con propiedades bioactivas, la búsqueda de alternativas frente a cultivos mayores vulnerables al cambio climático, y las políticas internacionales que promueven la agrobiodiversidad y los sistemas alimentarios resilientes, generan un escenario favorable para posicionar a los tubérculos y raíces andinas como cultivos estratégicos del siglo XXI (Padulosi, 2013).

Los almidones nativos extraídos de estos cultivos presentan características funcionales distintivas que los hacen atractivos para aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica, cosmética y de materiales biodegradables. El tamaño granular, la relación amilosa/amilopectina,

las temperaturas de gelatinización, y las propiedades reológicas de estos almidones difieren significativamente de los almidones convencionales de maíz, trigo o yuca, ofreciendo alternativas para el desarrollo de productos innovadores (Hoover, 2001).

## **Enfoque y Estructura del Libro**

El presente libro ha sido concebido como una obra de referencia académica que integra conocimientos de diversas disciplinas para proporcionar una comprensión holística de las raíces reservantes, tubérculos andinos y sus almidones. La estructura de la obra responde a una lógica que parte de los fundamentos biológicos, avanza hacia la caracterización y procesamiento tecnológico, y culmina con consideraciones de sostenibilidad y valorización.

El Capítulo 1 aborda la morfofisiología y características generales de las raíces reservantes, analizando los procesos de diferenciación celular, acumulación de carbohidratos, y adaptaciones anatómicas que permiten a estas estructuras funcionar como órganos de almacenamiento en condiciones ambientales restrictivas. El Capítulo 2 se enfoca en la biología y características distintivas de los tubérculos, examinando los mecanismos de tuberización, la regulación hormonal y ambiental del proceso, y las particularidades anatómicas y fisiológicas que diferencian a los tubérculos de otras estructuras vegetales.

El Capítulo 3 presenta una revisión exhaustiva de la biodiversidad genética y taxonomía del género *Solanum*, organizando las especies silvestres y cultivadas según sus niveles de ploidía y discutiendo las implicaciones evolutivas, agronómicas y de mejoramiento genético de esta extraordinaria variabilidad. El Capítulo 4 profundiza en la caracterización, extracción y eficiencia de los almidones obtenidos de tubérculos y raíces andinas, incluyendo metodologías analíticas, parámetros de calidad, y factores que afectan el rendimiento industrial.

El Capítulo 5 examina los procesos tecnológicos aplicables a raíces y almidones, incluyendo operaciones unitarias de transformación, modificación de almidones, y desarrollo de productos con valor agregado. El Capítulo 6 analiza los compuestos bioactivos presentes en estos cultivos y su valor nutracéutico, mientras que el Capítulo 7 aborda estrategias de sostenibilidad y gestión ambiental en la cadena agroindustrial andina.

## **Contribución Esperada**

Esta obra aspira a contribuir al fortalecimiento de la formación académica en ingeniería agroindustrial, ciencia y tecnología de alimentos, y disciplinas afines, proporcionando una base científica sólida para la toma de decisiones en investigación, desarrollo e innovación. Asimismo, busca servir como referencia para profesionales del sector público y privado involucrados en políticas de conservación de recursos fitogenéticos, desarrollo rural, y promoción de cadenas productivas sostenibles.

El enfoque adoptado reconoce la importancia de integrar el conocimiento científico moderno con los saberes tradicionales de las comunidades campesinas que han conservado y mejorado estos cultivos durante generaciones. Solo mediante esta integración será posible desarrollar estrategias que permitan aprovechar el potencial de los tubérculos y raíces andinas de manera que beneficie equitativamente a todos los actores involucrados, desde los pequeños agricultores hasta los consumidores finales, asegurando al mismo tiempo la conservación de la agrobiodiversidad para las generaciones futuras.

# Morfo-fisiología y características generales de las raíces reservantes

### 1.1. Introducción a las Raíces Reservantes

Las raíces reservantes representan estructuras vegetales especializadas que han evolucionado como órganos de almacenamiento de carbohidratos, permitiendo a las plantas sobrevivir en condiciones ambientales adversas y asegurar la disponibilidad de recursos energéticos para el rebrote estacional o la reproducción (Ravi, 2009). A diferencia de las raíces primarias cuya función principal es la absorción de agua y nutrientes, las raíces reservantes experimentan modificaciones anatómicas y fisiológicas significativas que maximizan su capacidad de acumulación de compuestos de reserva, principalmente almidón, aunque también pueden almacenar azúcares simples, inulina y otros polisacáridos según la especie (Kays, 2004).

En el contexto de los cultivos andinos, diversas especies han desarrollado raíces reservantes como estrategia adaptativa a las condiciones de estrés hídrico, térmico y nutricional característicos del altiplano. Entre las especies más relevantes se encuentran la maca (*Lepidium meyenii*), cultivada entre los 4000 y 4500 metros sobre el nivel del mar, el yacón (*Smallanthus*

sonchifolius), que acumula fructooligosacáridos en sus raíces tuberosas, y la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*), que produce raíces reservantes ricas en almidón altamente digestible (Hermann, 2002).

La comprensión de los procesos morfofisiológicos que gobiernan el desarrollo de raíces reservantes resulta fundamental para el mejoramiento genético, el manejo agronómico optimizado y el desarrollo de tecnologías postcosecha apropiadas. Este capítulo examina los aspectos anatómicos, fisiológicos y bioquímicos que caracterizan a estas estructuras, con énfasis en los cultivos andinos de mayor relevancia agroindustrial.

## **1.2. Origen y Desarrollo Ontogénico de Raíces Reservantes**

### **1.2.1 Desarrollo Embriológico y Diferenciación Inicial**

El desarrollo de raíces reservantes se inicia durante la germinación de la semilla, cuando la radícula embrionaria emerge y establece el sistema radicular primario. En especies con raíces reservantes, genes específicos regulan la transición desde una raíz absorbente convencional hacia una estructura especializada en almacenamiento (Villordon, 2009). Este proceso implica cambios en los programas de expresión génica que modulan la división y expansión celular, la diferenciación del tejido vascular, y la activación de rutas biosintéticas de carbohidratos de reserva.

En *Lepidium meyenii*, la diferenciación de la raíz reservante comienza aproximadamente 30 días después de la emergencia, cuando células del parénquima cortical y medular inician una división activa acompañada de acumulación de almidón (Gonzales, 2012).

Este proceso está regulado por la disponibilidad de fotoasimilados provenientes de las hojas, la relación fuente-sumidero, y factores ambientales como el fotoperiodo y la temperatura.

### **1.2.2. Proliferación Celular y Expansión**

El engrosamiento de las raíces reservantes resulta de dos procesos celulares coordinados: la división celular en meristemas secundarios y la expansión celular posterior. A diferencia del crecimiento secundario típico de raíces leñosas, donde predomina la actividad del cambium vascular, en raíces reservantes la proliferación ocurre principalmente en el parénquima de almacenamiento, con participación variable del cambium según la especie (Ravi, 2009).

En el yacón, el engrosamiento radical se caracteriza por la proliferación de células parenquimáticas en la región cortical y medular, formando un tejido de almacenamiento que puede alcanzar varios centímetros de diámetro. La tasa de división celular es máxima durante las primeras 8 a 10 semanas después del trasplante, coincidiendo con el periodo de mayor demanda de fotoasimilados (Seminario, 2003).

La expansión celular subsiguiente involucra el incremento del volumen de las vacuolas centrales, donde se acumulan azúcares solubles, y la deposición de gránulos de almidón en amiloplastos del citoplasma. Este proceso está regulado por la disponibilidad hídrica, la presión de turgencia celular, y la síntesis de proteínas estructurales de pared celular que permiten la extensión sin comprometer la integridad tisular (Kays, 2004).

## 1.3. Anatomía de Raíces Reservantes

### 1.3.1. Organización Tisular General

Las raíces reservantes presentan una organización anatómica que refleja su especialización funcional. Desde el exterior hacia el interior, se distinguen las siguientes regiones tisulares:

- **Peridermis:** En raíces maduras, la epidermis es reemplazada por una peridermis formada por felógeno (cambium suberoso), súber (corcho) y felodermis. Esta estructura proporciona protección mecánica y reduce la pérdida de agua, siendo particularmente importante en especies que experimentan períodos de dormancia.
- **Córtex secundario:** Constituido por células parenquimáticas de pared delgada, organizadas con espacios intercelulares que facilitan el intercambio gaseoso. En raíces reservantes de almidón, estas células contienen numerosos amiloplastos con gránulos de almidón de morfología característica según la especie.
- **Cilindro vascular:** Incluye el floema secundario, cambium vascular, xilema secundario y médula parenquimática. En raíces reservantes, el xilema está menos lignificado que en raíces no especializadas, manteniendo una textura relativamente suave incluso en estados maduros.
- **Médula:** Formada por células parenquimáticas grandes con abundante almacenamiento de car-



bohidratos. En algunas especies como la arracacha, la médula constituye la mayor proporción del volumen de la raíz reservante.

### **1.3.2. Características Citológicas del Parénquima de Almacenamiento**

Las células del parénquima de almacenamiento presentan características distintivas que maximizan su capacidad de acumulación de reservas. Estas células son típicamente grandes, con diámetros que pueden superar los 200  $\mu\text{m}$  en especies como el yacón, y poseen paredes celulares primarias delgadas que permiten la expansión (Hermann, 2002).

El citoplasma de estas células está dominado por amiloplastos en especies que acumulan almidón, u organelos especializados en el almacenamiento de otros carbohidratos. En *Lepidium meyenii*, los amiloplastos pueden ocupar hasta el 60 % del volumen celular en raíces completamente desarrolladas, con gránulos de almidón de forma elipsoidal y tamaño promedio de 8 a 12  $\mu\text{m}$  (Gonzales, 2012).

En contraste, las células de raíces de yacón acumulan principalmente fructooligosacáridos en vacuolas centrales, con concentraciones que pueden alcanzar 60 a 70 % del peso seco. Estas células presentan una actividad metabólica relativamente baja en estados de madurez fisiológica, con mitocondrias pequeñas y retículo endoplásmico escasamente desarrollado, reflejando su especialización en almacenamiento más que en metabolismo activo (Seminario, 2003).

### 1.3.3. Sistema Vascular y Distribución de Fotoasimilados

El sistema vascular de raíces reservantes muestra adaptaciones que optimizan el transporte y distribución de fotoasimilados desde las hojas hacia los tejidos de almacenamiento. El floema secundario presenta elementos cribosos de gran diámetro y células acompañantes metabólicamente activas que facilitan la descarga de sacarosa (Villordon, 2009).

La descarga de sacarosa desde el floema hacia las células de almacenamiento puede ocurrir por vía simplástica (a través de plasmodesmos) o apoplástica (mediada por transportadores de membrana). En raíces de maca, estudios ultraestructurales han demostrado la presencia de abundantes plasmodesmos entre células del floema y células parenquimáticas adyacentes, sugiriendo una descarga predominantemente simplástica (Gonzales, 2012).

El xilema secundario en raíces reservantes mantiene su función de transporte de agua y nutrientes minerales desde el suelo hacia las partes aéreas, pero presenta un grado de lignificación menor que en raíces no reservantes, lo que contribuye a la textura tierna característica de estos órganos. La proporción xilema:floema tiende a ser menor en raíces reservantes comparada con raíces absorbentes, reflejando la mayor importancia del transporte de fotoasimilados en estas estructuras.

## **1.4. Fisiología de la Acumulación de Reservas**

### **1.4.1. Partición de Fotoasimilados**

La acumulación de carbohidratos en raíces reservantes depende de la eficiencia con que la planta asigna los fotoasimilados producidos en las hojas hacia estos órganos sumidero. Este proceso, conocido como partición de fotoasimilados, está regulado por múltiples factores genéticos, hormonales y ambientales (Smith, 2008).

La relación fuente-sumidero es determinante en la eficiencia de acumulación. Las hojas funcionan como órganos fuente que producen sacarosa mediante fotosíntesis, mientras que las raíces reservantes actúan como sumideros que importan esta sacarosa y la convierten en compuestos de almacenamiento. La capacidad sumidero de una raíz reservante está determinada por su tamaño (sumidero físico) y por su actividad metabólica en la conversión de sacarosa en productos de reserva (sumidero metabólico) (Kays, 2004).

En condiciones óptimas, especies como la maca pueden destinar hasta el 70 % de los carbohidratos netos producidos hacia las raíces reservantes durante la fase de máximo crecimiento radical. Esta eficiencia de partición resulta de la coordinación entre la tasa fotosintética foliar, la conductancia del floema, y la actividad de enzimas de síntesis de almidón en las raíces (Gonzales, 2012).

### 1.4.2. Metabolismo de Carbohidratos en Raíces Reservantes

El metabolismo de carbohidratos en raíces reservantes involucra una serie de transformaciones enzimáticas que convierten la sacarosa importada en polisacáridos de almacenamiento. En raíces que acumulan almidón, como la maca y la arracacha, la sacarosa es escindida por invertasas o sacarosa sintasa, generando hexosas (glucosa y fructosa) o UDP-glucosa, respectivamente (Geigenberger, 2011).

La ruta biosintética del almidón se inicia con la conversión de glucosa-1-fosfato en ADP-glucosa por la enzima ADP-glucosa pirofosforilasa (AGPasa), considerada el paso limitante en la síntesis de almidón. La AGPasa es regulada alostéricamente, siendo activada por 3-fosfoglicerato (indicador de alta actividad fotosintética) e inhibida por fosfato inorgánico. Esta regulación permite ajustar la síntesis de almidón a la disponibilidad de fotoasimilados (Smith, 2008).

La ADP-glucosa es subsecuentemente utilizada por almidón sintasas para elongar las cadenas de amilosa y amilopectina. Estas enzimas trabajan en coordinación con enzimas ramificantes y desramificantes que determinan la estructura final del almidón. Diferentes isoformas de almidón sintasas están especializadas en la síntesis de amilosa (almidón sintasa granular) o en la elongación de cadenas de amilopectina (Geigenberger, 2011).

En el caso del yacón, que acumula fructooligosacáridos (FOS), el metabolismo difiere significativamente. La sacarosa es utilizada como sustrato por fructo-

siltransferasas, que catalizan la adición de residuos de fructosa a la molécula de sacarosa, generando cadenas de FOS de longitud variable (típicamente 3 a 10 residuos de fructosa). Las principales enzimas involucradas son la 1-SST (sacarosa:sacarosa 1-fructosiltransferasa) y la 1-FFT (fructano:fructano 1-fructosiltransferasa) (Seminario, 2003).

### **1.4.3. Regulación Hormonal del Desarrollo de Raíces Reservantes**

Las fitohormonas desempeñan roles críticos en la regulación del desarrollo de raíces reservantes, modulando procesos como la división celular, la expansión, la diferenciación de tejidos, y la acumulación de reservas. Las principales hormonas involucradas incluyen auxinas, citoquininas, giberelinas, ácido abscísico y etileno (Villordon, 2009).

Las auxinas, particularmente el ácido indol-3-acético (IAA), promueven la elongación de raíces y regulan la formación del cambium vascular. En raíces reservantes, gradientes de auxinas influyen en la distribución de divisiones celulares y la orientación del crecimiento. Concentraciones elevadas de auxinas en la región apical mantienen el crecimiento longitudinal, mientras que niveles intermedios en regiones subapicales favorecen el engrosamiento lateral (Ravi, 2009).

Las citoquininas estimulan la división celular y pueden antagonizar algunos efectos de las auxinas. En raíces reservantes, la aplicación exógena de citoquininas ha demostrado incrementar el número de células del parénquima de almacenamiento, aunque concentraciones excesivas pueden inhibir el engrosamiento ra-

dical. La relación auxinas:citoquininas es considerada un factor determinante en el balance entre crecimiento longitudinal y radial (Kays, 2004).

Las giberelinas generalmente inhiben el desarrollo de raíces reservantes, promoviendo en cambio el crecimiento vegetativo aéreo. Aplicaciones exógenas de giberelinas reducen la acumulación de almidón en raíces de maca, mientras que inhibidores de la síntesis de giberelinas (como el paclobutrazol) pueden incrementar el rendimiento de raíces reservantes en diversas especies (Gonzales, 2012).

El ácido abscísico (ABA) desempeña roles importantes en respuestas a estrés hídrico y en la inducción de dormancia. En raíces reservantes, el ABA puede promover la acumulación de reservas bajo condiciones de estrés, actuando como señal para redirigir recursos hacia almacenamiento en preparación para períodos.

## **1.5. Adaptaciones Morfofisiológicas a Condiciones del Altiplano**

### **1.5.1. Tolerancia a Estrés por Baja Temperatura**

Las raíces reservantes de cultivos andinos como la maca exhiben notables adaptaciones a las bajas temperaturas características del altiplano, donde las heladas nocturnas son frecuentes incluso durante la estación de crecimiento. Estas adaptaciones incluyen modificaciones en la composición lipídica de membranas celulares, acumulación de solutos compatibles (azúcares, prolina, glicinabetaína), y expresión de proteínas de protección contra frío (Gonzales, 2012).

Las membranas celulares de raíces de maca presentan mayor proporción de ácidos grasos insaturados comparadas con especies de tierras bajas, lo que mantiene la fluidez membranal a temperaturas reducidas. Esta adaptación previene la cristalización de lípidos de membrana y mantiene la funcionalidad de transportadores y enzimas asociadas a membranas (Hermann, 2002).

La acumulación de azúcares solubles (principalmente sacarosa y fructanos) no solo representa una forma de almacenamiento energético, sino que también funciona como mecanismo crioprotector. Estos azúcares reducen el punto de congelación del contenido celular (efecto coligativo) y estabilizan proteínas y membranas durante eventos de congelación-descongelación. En raíces de yacón, las concentraciones elevadas de fructooligosacáridos contribuyen significativamente a la tolerancia al frío (Seminario, 2003).

### **1.5.2 Respuestas a Estrés Hídrico**

Aunque las raíces reservantes tienen alta demanda hídrica durante su desarrollo, los cultivos andinos han evolucionado mecanismos para tolerar períodos de sequía moderada. Estos mecanismos incluyen ajuste osmótico, reducción de la conductancia estomática, y desarrollo de sistemas radicales profundos además de las raíces reservantes (Ravi, 2009).

El ajuste osmótico implica la acumulación de solutos que reducen el potencial osmótico celular, permitiendo mantener la turgencia y la expansión celular bajo condiciones de limitación hídrica. En raíces reservantes de maca expuestas a sequía moderada, se observa

incremento en las concentraciones de prolina, azúcares solubles y potasio, que contribuyen al mantenimiento del potencial hídrico tisular (Gonzales, 2012).

Las raíces absorbentes asociadas a las raíces reservantes pueden explorar capas profundas del suelo en búsqueda de agua, mientras que las raíces reservantes mismas pueden funcionar como reservorio hídrico durante períodos de déficit. La capacidad de retención de agua en el parénquima de almacenamiento permite a la planta mantener procesos metabólicos básicos durante sequías de corta duración.

### **1.5.3. Eficiencia en la Adquisición de Nutrientes**

Los suelos del altiplano frecuentemente presentan limitaciones nutricionales, particularmente en fósforo disponible debido a pH alcalino y presencia de carbonatos. Las raíces de cultivos andinos han desarrollado estrategias para maximizar la adquisición de nutrientes en estas condiciones restrictivas (Hermann, 2002).

La formación de asociaciones micorrízicas arbusculares es común en raíces de cultivos andinos, mejorando significativamente la absorción de fósforo, nitrógeno y micronutrientes. En raíces de maca, la colonización micorrízica puede alcanzar 60-80\% de las raíces absorbentes, contribuyendo tanto a la nutrición mineral como a la tolerancia a estrés hídrico (Gonzales, 2012).

Adicionalmente, las raíces de algunos cultivos andinos secretan exudados que modifican la disponibilidad de nutrientes en la rizosfera. Estos exudados pueden incluir ácidos orgánicos que solubilizan fosfatos de calcio, sideróforos que quelan hierro, y enzimas



fosfatasa que hidroliza compuestos orgánicos fosforados del suelo.

## **1.6. Casos Particulares de Raíces Reservantes Andinas**

### **1.6.1. Maca (*Lepidium meyenii*)**

La maca es una crucífera domesticada en las zonas altoandinas del Perú, cultivada entre 3800 y 4500 msnm. Su raíz reservante, conocida como hipocótilo engrosado, es el órgano de interés comercial debido a sus propiedades nutricionales y compuestos bioactivos (Gonzales, 2012).

La raíz de maca presenta forma napiforme (similar a un rábano), con colores que varían desde amarillo claro hasta negro, dependiendo del ecotipo. El peso promedio de raíces secas oscila entre 10 y 50 gramos. Anatómicamente, la raíz de maca se caracteriza por una peridermis bien desarrollada, un córtex extenso con células parenquimáticas repletas de gránulos de almidón, y un cilindro vascular central con xilema escasamente lignificado.

El almidón constituye 50-60\% del peso seco de la raíz, con gránulos de forma elipsoidal a esférica y tamaño promedio de 8-12  $\mu\text{m}$ . Además del almidón, las raíces de maca acumulan proteínas (10-14\% del peso seco), lípidos (2-3\%), y compuestos bioactivos incluyendo glucosinolatos, macamidas y macaenos, que contribuyen a sus propiedades adaptogénicas y nutraceuticas (Gonzales, 2012).

### 1.6.2. Yacón (*Smallanthus sonchifolius*)

El yacón es una Asteraceae cultivada en zonas andinas entre 2000 y 3500 msnm, caracterizada por producir raíces tuberosas que acumulan principalmente fructooligosacáridos (FOS) en lugar de almidón. Esta particularidad metabólica confiere al yacón propiedades funcionales distintivas (Seminario, 2003).

Las raíces de yacón son fusiformes, con peso individual que puede superar 1 kilogramo en condiciones óptimas. El color de la pulpa varía de blanco a morado, dependiendo del contenido de antocianinas. La textura es crujiente y el sabor dulce, debido a las altas concentraciones de FOS y azúcares simples (fructosa, glucosa, sacarosa).

Anatómicamente, las raíces de yacón presentan una peridermis delgada, un córtex extenso con células parenquimáticas de gran tamaño (hasta 300  $\mu\text{m}$  de diámetro), y un cilindro vascular con haces dispersos. Las células parenquimáticas contienen vacuolas centrales donde se acumulan los FOS en concentraciones de 60-70\% del peso seco (Seminario, 2003).

Los FOS del yacón tienen grado de polimerización predominantemente entre 3 y 10 residuos de fructosa, con configuración  $\beta(2\rightarrow1)$ . Estos polisacáridos no son hidrolizados por enzimas digestivas humanas, comportándose como fibra soluble con propiedades prebióticas. El consumo de yacón ha demostrado efectos beneficiosos en la regulación de glucemia, perfil lipídico, y salud intestinal (Seminario, 2003).

### 1.6.3. Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*)

La arracacha es una Apiácea cultivada en zonas andinas de altitud media (1800-3000 msnm), caracterizada por producir raíces reservantes cilíndricas agrupadas en fascículos. Es apreciada por su alto contenido de almidón altamente digestible y su sabor distintivo (Hermann, 2002).

Las raíces de arracacha alcanzan longitudes de 15-30 cm y diámetros de 3-8 cm, con peso individual de 100-400 gramos. El color de la pulpa varía de blanco a amarillo o morado, dependiendo de la variedad y el contenido de carotenoides y antocianinas. La textura es firme antes de la cocción y se vuelve suave y harinosa tras el procesamiento térmico.

La composición química de las raíces incluye 70-80% de agua, 20-25 % de almidón (base seca), 1-2 % de proteína, y trazas de lípidos. El almidón de arracacha se caracteriza por gránulos pequeños (2-20  $\mu\text{m}$ ), alta digestibilidad, y propiedades funcionales que lo hacen adecuado para alimentación infantil y dietas especiales (Hermann, 2002).

Anatómicamente, las raíces de arracacha presentan estructura secundaria típica, con predominio de parénquima de almacenamiento en la región medular y cortical. Los gránulos de almidón se distribuyen uniformemente en el citoplasma de células parenquimáticas, ocupando la mayor parte del volumen celular en raíces maduras.

## **1.7. Consideraciones Agronómicas para Optimización del Desarrollo Radical**

El manejo agronómico de cultivos con raíces reservantes debe orientarse a maximizar la producción de biomasa radical de calidad, lo que requiere comprender y optimizar los factores que influyen en el desarrollo de estas estructuras (Villordon, 2009).

La densidad de plantación afecta significativamente el rendimiento y tamaño de raíces reservantes. Densidades excesivas incrementan la competencia por luz, agua y nutrientes, resultando en raíces de menor tamaño individual aunque el rendimiento total por área puede no verse afectado. En maca, densidades óptimas oscilan entre 30 y 40 plantas/m<sup>2</sup>, mientras que en yacón, debido al mayor tamaño de planta, se utilizan densidades de 1-2 plantas/m<sup>2</sup> (Gonzales, 2012).

La disponibilidad hídrica es crítica durante las fases de división y expansión celular. Déficits hídricos severos durante estos períodos reducen irreversiblemente el tamaño final de las raíces. Sin embargo, una ligera restricción hídrica durante la maduración puede mejorar la concentración de materia seca y compuestos bioactivos. Sistemas de riego por goteo o aspersión permiten un control preciso del régimen hídrico (Seminario, 2003).

La fertilización debe balancear la producción de biomasa aérea (fuente de fotoasimilados) con el desarrollo radical. Excesos de nitrógeno promueven crecimiento vegetativo en detrimento de las raíces reservantes, mientras que deficiencias limitan la producción total de biomasa. Relaciones N:P:K apropiadas para raíces reservantes generalmente favorecen mayores proporciones de potasio, que promueve la acumulación de carbohidratos y mejora la calidad de conservación (Ravi, 2009).

El momento de cosecha determina tanto el rendimiento como la calidad de las raíces. La cosecha prematura resulta en raíces pequeñas y con bajo contenido de materia seca, mientras que el retraso puede conducir a lignificación excesiva o brotación. Indicadores de madurez fisiológica incluyen la senescencia de hojas basales, cambios en el color de la peridermis, y alcance de tamaño característico según la especie y variedad (Kays, 2004).



## Capítulo II

# Biología y Características Distintivas de los Tubérculos

### 2.1. Introducción a los Tubérculos

Los tubérculos constituyen órganos vegetales subterráneos especializados que resultan del engrosamiento de tallos modificados, funcionando como estructuras de almacenamiento de carbohidratos y propagación vegetativa (Ewing, 1995). A diferencia de las raíces reservantes, los tubérculos son de naturaleza caulinar, conservando características anatómicas propias de tallos como la presencia de nudos, entrenudos, yemas axilares y médula central (Vreugdenhil, 2007).

Los tubérculos representan una innovación evolutiva que ha permitido a numerosas especies sobrevivir en ambientes con estacionalidad marcada, sequías prolongadas, o condiciones de congelamiento estacional. La capacidad de acumular grandes cantidades de almidón en estructuras subterráneas protegidas, combinada con la presencia de yemas viables para regeneración, confiere ventajas adaptativas significativas (Bamberg, 2010).

En el contexto andino, los tubérculos constituyen la base de la seguridad alimentaria desde tiempos precolombinos. La papa (*Solanum tuberosum*) es el tubérculo más importante a nivel

mundial, pero el altiplano peruano-boliviano alberga diversidad de tubérculos andinos menores que incluyen la oca (*Oxalis tuberosa*), el olluco (*Ullucus tuberosus*), la mashua (*Tropaeolum tuberosum*), y el aña o isaño (*Tropaeolum tuberosum*), cada uno con características biológicas, nutricionales y culturales distintivas (NRC, 1989).

Este capítulo examina los procesos biológicos que gobiernan la formación de tubérculos, sus características anatómicas y fisiológicas distintivas, los mecanismos de regulación del proceso de tuberización, y las particularidades de los principales tubérculos andinos desde una perspectiva agroindustrial.

## **2.2. Proceso de Tuberización**

### **2.2.1 Definición y Etapas de la Tuberización**

La tuberización es el proceso mediante el cual estolones subterráneos experimentan modificaciones morfológicas, anatómicas y fisiológicas que resultan en la formación de tubérculos. Este proceso puede dividirse en tres etapas principales: inducción, iniciación y desarrollo (Vreugdenhil, 2007).

La inducción representa la fase en la cual señales ambientales y endógenas preparan a la planta para la formación de tubérculos. Durante esta etapa, aún no hay cambios morfológicos visibles, pero a nivel molecular ocurren modificaciones en la expresión génica de estolones que los predisponen a la tuberización. Factores inductores incluyen el fotoperiodo corto, temperaturas nocturnas frescas, niveles adecuados de nitrógeno, y balance hormonal apropiado (Jackson, 1999).



La iniciación se caracteriza por el inicio del engrosamiento del estolón subapical. Durante esta fase, células del parénquima perimedular comienzan divisiones periclinales y anticlinales que incrementan el diámetro del estolón. Simultáneamente, se activan rutas biosintéticas de almidón y se incrementa el transporte de sacarosa desde las hojas hacia estos órganos sumidero emergentes. La iniciación es visible como un engrosamiento sutil en regiones subapicales de estolones, que ocurre típicamente 4-6 semanas después de la emergencia en condiciones inductivas (Ewing, 1995).

El desarrollo o crecimiento del tubérculo involucra expansión celular masiva acompañada de acumulación intensiva de almidón. Las células del parénquima de almacenamiento pueden incrementar su volumen 50-100 veces durante esta fase. El crecimiento del tubérculo sigue una curva sigmoidea, con una fase inicial de crecimiento lento, seguida de crecimiento rápido exponencial, y finalmente una fase de crecimiento decelerado conforme el tubérculo alcanza madurez fisiológica (Vreugdenhil, 2007).

### **2.2.2. Regulación Ambiental de la Tuberización**

La tuberización en especies como *Solanum tuberosum* está fuertemente regulada por factores ambientales, siendo el fotoperiodo el estímulo más consistente. Las variedades de papa de días cortos (mayoría de cultivares andinos tradicionales) requieren fotoperiodos menores a 12 horas para tuberizar eficientemente, mientras que variedades adaptadas a latitudes altas pueden tuberizar bajo días largos (Rodríguez-Falcon, 2006).

La percepción del fotoperiodo ocurre en las hojas, donde el sistema del fitocromo y criptocromos integra información sobre la duración e intensidad lumínica. Bajo condiciones inductivas de día corto, se genera una señal móvil que se transloca a través del floema hacia los estolones, promoviendo la tuberización. Esta señal, históricamente denominada “tuberigen” o “tuberin”, ha sido identificada molecularmente como proteínas de la familia FLOWERING LOCUS T (FT), particularmente SP6A en papa, que actúan como inductores móviles de tuberización (Navarro, 2011).

La temperatura constituye otro factor ambiental crítico. Temperaturas nocturnas entre 12-20°C favorecen la tuberización en papa, mientras que temperaturas superiores a 25°C pueden inhibir el proceso incluso bajo fotoperiodos inductivos. Las bajas temperaturas nocturnas promueven la partición de carbohidratos hacia tubérculos en formación y reducen la respiración nocturna, incrementando la eficiencia de acumulación de reservas (Ewing, 1995).

La disponibilidad de nitrógeno afecta significativamente la tuberización. Niveles excesivos de nitrógeno prolongan la fase vegetativa y retrasan la tuberización, favoreciendo el crecimiento foliar en detrimento de los tubérculos. Por el contrario, deficiencias severas de nitrógeno reducen la capacidad fotosintética y la disponibilidad de fotoasimilados para tuberización. Un balance adecuado, con suficiente nitrógeno durante el establecimiento vegetativo seguido de reducción durante la tuberización, optimiza el rendimiento de tubérculos (Vreugdenhi, 2007).

### 2.2.3. Regulación Hormonal del Proceso de Tuberización

Las fitohormonas desempeñan roles centrales en la regulación de la tuberización, actuando como integradores de señales ambientales y mediadoras de cambios en el desarrollo. Las principales hormonas involucradas incluyen giberelinas, ácido abscísico, ácido jasmónico, citoquininas y etileno (Ferne, 2002).

Las giberelinas (GAs) actúan como inhibidoras de la tuberización. Aplicaciones exógenas de GA3 previenen o retrasan la formación de tubérculos, mientras que inhibidores de la biosíntesis de giberelinas (como el paclobutrazol o uniconazol) promueven la tuberización prematura. Bajo condiciones inductivas de día corto, los niveles de giberelinas activas disminuyen en estolones, mientras que bajo días largos no inductivos, los niveles permanecen elevados. Esta modulación de giberelinas por el fotoperiodo representa un mecanismo clave en la regulación fotoperiódica de la tuberización (Xu, 1998).

El ácido abscísico (ABA) ha sido implicado como promotor de la tuberización. Incrementos en los niveles de ABA se observan durante la transición estolón-tubérculo, y aplicaciones exógenas de ABA pueden inducir tuberización bajo condiciones no inductivas. El ABA podría actuar promoviendo la partición de carbohidratos hacia tubérculos, modulando la expresión de genes de síntesis de almidón, y antagonizando los efectos inhibitorios de las giberelinas (Vreugdenhil, 2007).

El ácido jasmónico (JA) y su derivado metil jasmonato

(MeJA) son potentes inductores de tuberización. Aplicaciones exógenas de JA pueden inducir la formación de tubérculos incluso bajo condiciones no inductivas de día largo. El JA actúa modulando la expresión de genes específicos de tuberización, incluyendo aquellos involucrados en la síntesis de almidón, expansión celular, y diferenciación de tejidos (Ferne, 2002).

Las citoquininas presentan efectos complejos dependiendo de la concentración, el tejido, y el estado de desarrollo. En general, concentraciones moderadas de citoquininas promueven la división celular necesaria para la iniciación de tubérculos, pero niveles excesivamente altos pueden inhibir el desarrollo posterior al favorecer el crecimiento de brotes en detrimento de tubérculos (Ewing, 1995).

## **2.3. Anatomía de Tubérculos**

### **2.3.1. Organización Tisular General**

Los tubérculos, siendo tallos modificados, conservan la organización anatómica básica caulinar, aunque con modificaciones significativas relacionadas con su función de almacenamiento. Desde el exterior hacia el interior, un tubérculo típico de papa presenta las siguientes regiones (Reeve, 1967):

- **Peridermis:** Tejido protector externo que reemplaza a la epidermis en tubérculos maduros. Está formada por varias capas de células suberizadas derivadas del felógeno (meristemo secundario). La peridermis proporciona protección contra deshidratación, patógenos, y daño mecánico.

- **Corteza:** Región compuesta por varias capas de células parenquimáticas localizadas inmediatamente debajo de la peridermis. En tubérculos de papa, la corteza representa 2-3% del volumen total y contiene células con gránulos de almidón menos abundantes que en regiones internas.
- **Tejido vascular:** Formado por haces vasculares distribuidos en un anillo que delimita la región perimedular. Estos haces contienen xilema y floema, responsables del transporte de agua, nutrientes y fotoasimilados durante el desarrollo del tubérculo.
- **Parénquima perimedular:** Constituye la mayor porción del tubérculo (aproximadamente 80-85 % del volumen) y representa el principal tejido de almacenamiento. Las células parenquimáticas son grandes (100-300  $\mu\text{m}$  de diámetro), de pared delgada, y están densamente empaquetadas con gránulos de almidón.
- **Médula:** Región central del tubérculo formada por células parenquimáticas que tienden a ser ligeramente más grandes y contener menos almidón que las células del parénquima perimedular. En tubérculos maduros, la médula representa 10-15 % del volumen.

### 2.3.2. Características de las Yemas y Ojos

Una característica distintiva de los tubérculos es la presencia de yemas u “ojos” distribuidos en su superficie, siguiendo un patrón helicoidal característico de la filotaxis caulinar. Cada ojo

corresponde a un nudo del tallo modificado y contiene típicamente 3-5 yemas axilares en diferentes estados de desarrollo (Ewing, 1995).

Los ojos se concentran con mayor densidad en el extremo apical del tubérculo (región opuesta al punto de inserción del estolón), reflejando la dominancia apical característica de tallos. Las yemas en los ojos apicales tienen mayor vigor de brotación y tienden a emerger primero cuando el tubérculo es utilizado como semilla (Vreugdenhil, 2007).

Cada ojo está rodeado por una depresión superficial en el tubérculo y presenta estructuras anatómicas complejas. Las yemas axilares están compuestas por un meristemo apical protegido por primordios foliares escamosos. La profundidad de los ojos es una característica varietal importante: cultivares con ojos superficiales son preferidos para procesamiento industrial debido a menores pérdidas durante el pelado (Reeve, 1967).

### **2.3.3. Parénquima de Almacenamiento: Estructura y Composición**

El parénquima de almacenamiento constituye el tejido económicamente más importante del tubérculo. Las células parenquimáticas presentan características especializadas para maximizar la acumulación de almidón. Son células de gran tamaño, con paredes primarias delgadas compuestas principalmente por celulosa, hemicelulosa y pectinas en proporciones que permiten expansión durante el crecimiento (Burton, 1989).

El citoplasma de estas células está dominado por amiloplastos, organelos especializados en la síntesis y almacenamiento de almidón. Un único amiloplasto puede contener múltiples gránulos de almidón, cuyo tamaño varía entre especies. En papa, los gránulos de almidón presentan tamaños de 5 a 100  $\mu\text{m}$ , con morfología ovoide a esférica. En oca, los gránulos son más pequeños (2-25  $\mu\text{m}$ ) y presentan forma poligonal característica (Hoover, 2001).

La densidad de empaquetamiento de gránulos de almidón en células del parénquima perimedular alcanza valores de 70-80 % del volumen celular en tubérculos maduros de papa. Esta alta densidad de almacenamiento resulta de la coordinación entre la importación continua de sacarosa, su conversión eficiente en almidón, y la expansión celular que acomoda los gránulos crecientes (Geigenberger, 2011).

Además del almidón, las células del parénquima contienen proteínas (principalmente patatina, que representa 40 % de la proteína soluble total en papa), compuestos fenólicos (ácido clorogénico, tirosina), vitaminas (vitamina C, vitaminas del complejo B), y minerales (potasio, fósforo, magnesio). La distribución de estos componentes no es uniforme, observándose gradientes desde la peridermis hacia el centro del tubérculo (Burton, 1989).

#### **2.3.4. Peridermis y Capas Protectoras**

La peridermis del tubérculo se origina de la actividad del felógeno, un meristemo lateral que se establece en capas subepidérmicas del estolón durante las etapas iniciales de tuberización. El felógeno produce células

hacia el exterior que se suberifican formando el súber o corcho, y células hacia el interior que forman la felodermis (Reeve, 1967).

La suberización implica la deposición de suberina, un biopolímero hidrofóbico compuesto por ácidos grasos de cadena larga, alcoholes alifáticos y compuestos aromáticos. Esta barrera hidrofóbica reduce la pérdida de agua (transpiración) del tubérculo y dificulta la entrada de patógenos. El espesor de la peridermis varía entre cultivares, siendo más gruesa en variedades rústicas adaptadas a almacenamiento prolongado (Lulai, 2000).

Durante la cosecha y manipulación postcosecha, la peridermis frecuentemente sufre daños mecánicos que exponen tejidos internos. En respuesta, los tubérculos activan procesos de cicatrización que involucran la formación de peridermis de cicatrización. Este proceso requiere humedad relativa elevada (95-98 %), temperatura moderada (15-20°C), y aireación adecuada. La formación exitosa de peridermis de cicatrización es crítica para prevenir deshidratación excesiva y entrada de patógenos durante el almacenamiento (Lulai, 2000).

## **2.4. Fisiología del Crecimiento y Desarrollo de Tubérculos**

### **2.4.1. Partición de Fotoasimilados hacia Tubérculos**

El rendimiento de tubérculos depende fundamentalmente de la eficiencia con que los fotoasimilados producidos en hojas son particionados hacia estos órganos sumidero. En condiciones óptimas, cultivares



modernos de papa pueden destinar 70-85\% de los fotosintatos netos hacia tubérculos durante la fase de máximo crecimiento (Oparka, 1986).

La partición de carbohidratos hacia tubérculos está regulada por la fuerza sumidero de estos órganos, que depende tanto de su tamaño (sumidero físico) como de su actividad metabólica (sumidero fisiológico). El establecimiento de un número adecuado de tubérculos por planta es crítico: muy pocos tubérculos pueden resultar en tubérculos excesivamente grandes con menor calidad, mientras que exceso de tubérculos compete por fotoasimilados resultando en tubérculos pequeños de bajo valor comercial (Vreugdenhil, 2007).

El transporte de sacarosa desde hojas hacia tubérculos ocurre principalmente a través del floema. La descarga de sacarosa en tubérculos puede seguir rutas simplásticas o apoplásticas dependiendo del estado de desarrollo. En etapas tempranas, predomina la descarga simplástica a través de plasmodesmos, mientras que en tubérculos en rápido crecimiento, la descarga apoplástica mediada por transportadores de membrana adquiere mayor importancia (Oparka, 1986).

#### **2.4.2. Metabolismo de Carbohidratos en Tubérculos**

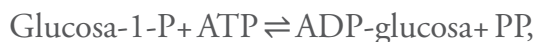
El metabolismo de carbohidratos en tubérculos en desarrollo está dominado por la conversión de sacarosa importada en almidón. Este proceso involucra múltiples pasos enzimáticos coordinados que determinan tanto la eficiencia de acumulación como las propiedades del almidón resultante (Geigenberger, 2011).

La sacarosa que ingresa a las células del parénquima de almacenamiento es escindida por sacarosa sintasa (SuSy) o invertasas. En tubérculos de papa, la ruta predominante involucra a la sacarosa sintasa, que cataliza la reacción reversible:



La UDP-glucosa generada puede ser convertida en glucosa-1-fosfato por UDP-glucosa pirofosforilasa, que posteriormente es sustrato para ADP-glucosa pirofosforilasa (AGPasa), la enzima limitante en la síntesis de almidón (Smith, 2008).

La AGPasa cataliza la reacción:



Esta enzima está regulada alostéricamente, siendo activada por 3-fosfoglicerato (3-PGA, indicador de alta tasa fotosintética) e inhibida por fosfato inorgánico ( $\text{P}_i$ , indicador de bajo estatus energético). Esta regulación permite ajustar la síntesis de almidón a la disponibilidad de fotoasimilados y al balance energético celular (Geigenberger, 2011).

La ADP-glucosa es utilizada por almidón sintasas para elongar cadenas de glucosa. Existen múltiples isoformas de almidón sintasas con funciones especializadas. El almidón sintasa granular (GBSS) es responsable principalmente de la síntesis de amilosa al elongar cadenas dentro del gránulo de almidón, mientras que otras isoformas (SSI, SSII, SSIII, SSIV) participan en la síntesis de amilopectina (Smith, 2008).

Las enzimas ramificantes (SBE) introducen enlaces  $\alpha$ -1,6 en las cadenas de amilopectina, creando la estructura ramificada característica. Las enzimas desramificantes (isoamilasas, pululanastas) eliminan ramificaciones inapropiadas, siendo esenciales para la correcta organización cristalina del almidón. La coordinación de estas actividades enzimáticas determina la proporción amilosa:amilopectina, la longitud de cadenas, y la estructura final del almidón (Geigenberger, 2011).

### 2.4.3. Respiración y Balance Energético

La respiración en tubérculos en desarrollo es intensa, reflejando la alta demanda energética de los procesos biosintéticos, el transporte activo de solutos, y el mantenimiento celular. La tasa respiratoria (consumo de  $O_2$  o producción de  $CO_2$ ) es máxima durante las fases de división y expansión celular rápida, y disminuye conforme el tubérculo alcanza madurez (Burton, 1989).

El cociente respiratorio ( $CR = \text{moles } CO_2 \text{ producido} / \text{moles } O_2 \text{ consumido}$ ) en tubérculos en crecimiento activo es típicamente cercano a 1.0, indicando metabolismo predominantemente aeróbico de carbohidratos. Bajo condiciones de hipoxia (deficiencia de oxígeno), el CR puede exceder 1.0 debido a fermentación, lo que resulta en acumulación de etanol, acetaldehído y lactato, compuestos que pueden causar sabores desagradables y muerte celular si la condición persiste (Geigenberger, 2003).

La eficiencia de conversión de sacarosa en almidón está influenciada por la tasa respiratoria nocturna.

Temperaturas nocturnas frescas (12-15°C) reducen la respiración de mantenimiento, incrementando la proporción de sacarosa importada que se convierte en almidón almacenado en lugar de ser oxidada para energía. Este es uno de los mecanismos por los cuales temperaturas nocturnas frescas favorecen mayor acumulación de materia seca en tubérculos (Ewing, 1995).

## **2.5. Dormancia y Brotación de Tubérculos**

### **2.5.1. Fases de la Dormancia**

Los tubérculos recién cosechados entran en un período de dormancia durante el cual las yemas no brotan incluso bajo condiciones favorables de temperatura y humedad. Este mecanismo adaptativo previene la brotación prematura durante condiciones ambientales adversas y es de gran importancia para el almacenamiento postcosecha (Suttle, 2007).

La dormancia puede dividirse en dos fases: dormancia endógena (verdadera) y dormancia exógena (impuesta). Durante la dormancia endógena, factores internos del tubérculo previenen la brotación independientemente de las condiciones externas. Esta fase típicamente dura 2-4 meses en papa, aunque varía considerablemente entre cultivares. La dormancia exógena ocurre cuando las condiciones ambientales (temperatura baja, falta de oxígeno, aplicación de inhibidores) previenen la brotación de tubérculos que han completado la dormancia endógena (Suttle, 2007).

A nivel bioquímico, la dormancia está asociada con balances hormonales específicos. Los tubérculos dor-

mantes presentan niveles elevados de ácido abscísico (ABA) y bajos niveles de giberelinas y citoquininas. Conforme la dormancia es superada, disminuyen los niveles de ABA e incrementan las hormonas promotoras del crecimiento, permitiendo la activación de yemas (Suttle, 2007).

### **2.5.2. Proceso de Brotación**

La brotación inicia con la activación del meristemo apical en las yemas, seguida de división celular, elongación de primordios foliares, y emergencia del brote a través de la peridermis. El proceso requiere movilización de reservas del tubérculo (almidón, proteínas) para proporcionar energía y precursores para el crecimiento del brote (Coleman, 2001).

El almidón es hidrolizado por amilasas ( $\alpha$ -amilasa,  $\beta$ -amilasa) a maltosa y glucosa, que son exportadas hacia los brotes en crecimiento. Las proteínas de almacenamiento, principalmente patatina, son degradadas por proteasas a aminoácidos que son reutilizados en la síntesis de nuevas proteínas en los brotes. Esta movilización de reservas resulta en pérdida de peso, arrugamiento, y deterioro de la calidad culinaria de los tubérculos (Coleman, 2001).

La brotación durante el almacenamiento es generalmente indeseable desde la perspectiva comercial, por lo que se emplean diversas estrategias para prolongar la dormancia o suprimir la brotación. Estas incluyen almacenamiento a temperaturas bajas (4-8°C), aplicación de inhibidores químicos de brotación (clorprofam, 1,4-dimetilnaftaleno), o tratamientos físicos (irradiación gamma) (Suttle, 2007).

## **2.6. Tubérculos Andinos: Características Particulares**

### **2.6.1. Oca (*Oxalis tuberosa*)**

La oca es el segundo tubérculo más importante en los Andes después de la papa, cultivado desde Venezuela hasta Argentina, con mayor concentración en el altiplano peruano-boliviano entre 3000 y 4000 msnm (NRC, 1989). Pertenecce a la familia Oxalidaceae y se caracteriza por producir tubérculos cilíndricos a elipsoidales con colores diversos (blanco, amarillo, rojo, morado, negro) y textura cerosa característica.

Los tubérculos de oca varían en tamaño desde 2 hasta 10 cm de longitud y pueden pesar entre 10 y 200 gramos. Una característica distintiva es la presencia de yemas distribuidas en depresiones superficiales a lo largo del tubérculo. La peridermis es delgada y fácilmente removible, lo que requiere cuidado durante la cosecha y postcosecha para evitar daños, (Arbizu, 1997).

Anatómicamente, los tubérculos de oca presentan corteza delgada, parénquima de almacenamiento abundante con células que contienen gránulos de almidón pequeños (2-25  $\mu\text{m}$ ) de forma característica poligonal. El contenido de almidón oscila entre 70-80 % de la materia seca, con propiedades funcionales distintivas incluyendo alta temperatura de gelatinización (68-72°C) y alta capacidad de retención de agua (Hoover, 2001).

Una característica química notable de la oca es su contenido de ácido oxálico, que puede alcanzar 500-1000 mg/100 g en algunas variedades. El ácido oxálico confiere sabor ácido característico y puede formar com-

plejos con minerales como calcio y hierro, reduciendo su biodisponibilidad. Tradicionalmente, los tubérculos de oca son expuestos al sol durante varios días (proceso de “desacidificación”) antes del consumo, lo que reduce el contenido de oxalatos mediante fotodegradación y aumenta la concentración de azúcares por hidrólisis parcial del almidón (Arbizu, 1997).

### 2.6.2. Olluco (*Ullucus tuberosus*)

El olluco es un tubérculo de la familia Basellaceae, cultivado en zonas andinas entre 2800 y 4200 msnm. Se caracteriza por producir tubérculos pequeños (2-8 cm de longitud) con formas variables (cilíndrica, ovoide, curvada) y colores brillantes (amarillo, rosado, rojo, morado) debido a la presencia de betalaínas (NRC, 1989).

La superficie de los tubérculos de olluco es lisa y brillante, con yemas distribuidas superficialmente. La peridermis es delgada y la textura del parénquima es crujiente y mucilaginoso debido al alto contenido de mucílagos (polisacáridos hidrofílicos). Esta característica confiere propiedades espesantes y emulsificantes que son valoradas en aplicaciones culinarias tradicionales (Tapia, 2002).

El contenido de almidón en olluco es relativamente bajo (50-60\% de materia seca) comparado con papa u oca, con mayor proporción de azúcares solubles y proteínas. Los gránulos de almidón son muy pequeños (1-9  $\mu\text{m}$ ) con forma ovoide a esférica. Las propiedades reológicas del almidón de olluco incluyen baja viscosidad de pico y alta estabilidad al congelamiento-descongelamiento, lo que lo hace adecuado para productos congelados (Hoover, 2001).

Nutricionalmente, el olluco presenta contenidos apreciables de vitamina C (20-30 mg/100 g), calcio, y compuestos fenólicos con actividad antioxidante. Los pigmentos betalaínicos (betacianinas y betaxantinas) responsables de los colores brillantes presentan propiedades antioxidantes y potencial como colorantes naturales para la industria alimentaria (Tapia, 2002).

### 2.6.3. Mashua (*Tropaeolum tuberosum*)

La mashua pertenece a la familia Tropaeolaceae y se cultiva principalmente en el altiplano peruano-boliviano entre 3200 y 4100 msnm. Produce tubérculos alargados y cilíndricos con colores que varían de amarillo pálido a morado oscuro, frecuentemente con manchas o estrías contrastantes (NRC, 1989).

Los tubérculos de mashua presentan sabor picante característico debido a la presencia de glucosinolatos, compuestos azufrados que son hidrolizados por la enzima mirosinasa liberando isotiocianatos. Esta característica organoléptica limita su aceptación como alimento directo, pero los glucosinolatos presentan propiedades bioactivas incluyendo actividad antimicrobiana, antifúngica, e insecticida (Johns, 1982).

El contenido de almidón en mashua es similar al de la papa (70-80\% de materia seca), con gránulos de tamaño intermedio (10-40  $\mu\text{m}$ ) y forma ovoide. El almidón de mashua presenta propiedades funcionales adecuadas para aplicaciones industriales, con temperatura de gelatinización de 58-64°C y buena estabilidad de viscosidad (Hoover, 2001).

Tradicionalmente, la mashua ha sido utilizada no solo



como alimento sino también en medicina popular andina, atribuyéndosele propiedades antiinflamatorias, diuréticas, y en el tratamiento de afecciones prostáticas. Estudios fitoquímicos han identificado compuestos fenólicos, flavonoides, y alcaloides que podrían sustentar algunas de estas aplicaciones tradicionales (Johns, 1982).

## **2.7. Consideraciones Agronómicas para Producción de Tubérculos**

El manejo agronómico óptimo de cultivos de tubérculos debe considerar los requerimientos fisiológicos específicos que maximizan tanto el rendimiento como la calidad (Vreugdenhil, 2007).

La selección de semilla de alta calidad es fundamental. Tubérculos-semilla deben estar libres de enfermedades (particularmente virosis), presentar tamaño adecuado (40-60 gramos para papa), y proceder de cultivos certificados. El pre-brotado de tubérculos-semilla (exposición a luz difusa para inducir brotes cortos y robustos) mejora la uniformidad de emergencia y el vigor del cultivo (Ewing, 1995).

La densidad de plantación afecta el número y tamaño de tubérculos. Densidades altas (50,000-60,000 plantas/ha en papa) favorecen mayor rendimiento total pero tubérculos más pequeños, mientras que densidades bajas producen tubérculos grandes pero menor rendimiento total. La densidad óptima debe ajustarse según el mercado objetivo y la variedad (Vreugdenhil, 2007).

El manejo hídrico es crítico particularmente durante la tuberización y engrosamiento de tubérculos. Déficits hídricos durante estos períodos reducen irreversiblemente el

rendimiento. Sistemas de riego por aspersión o goteo permiten mantener humedad del suelo en rango óptimo (70-80\% de capacidad de campo). Excesos de humedad pueden promover pudriciones y lenticelas abiertas que deterioran la calidad (Shock, 2013).

La fertilización debe balancear los requerimientos nutricionales del cultivo con la optimización de la calidad de tubérculos. Excesos de nitrógeno retrasan la maduración, incrementan susceptibilidad a enfermedades, y pueden reducir el contenido de materia seca de tubérculos. Adecuadas proporciones de potasio mejoran el contenido de materia seca, la calidad de conservación, y reducen defectos fisiológicos como corazón hueco (Vreugdenhil, 2007).

El momento de cosecha debe determinarse considerando la madurez fisiológica del cultivo (indicada por senescencia del follaje), el uso final de los tubérculos (consumo fresco vs. almacenamiento vs. procesamiento industrial), y las condiciones climáticas. La cosecha prematura resulta en tubérculos con peridermis débil susceptible a daños, mientras que el retraso puede exponer tubérculos a temperaturas extremas o precipitaciones que afectan la calidad (Ewing, 1995).

# Biodiversidad Genética y Taxonomía de Solanum Nativos

### 3.1. Introducción al Género Solanum

El género *Solanum* L. es uno de los más grandes y complejos dentro de las angiospermas, comprendiendo aproximadamente 1500 especies distribuidas en todos los continentes excepto la Antártida (Spooner, 2014). Este género pertenece a la familia Solanaceae, que incluye numerosas especies de importancia económica como el tomate (*Solanum lycopersicum*), la berenjena (*Solanum melongena*), y diversas especies ornamentales y medicinales (Knapp, 2013).

Dentro del género *Solanum*, la sección *Petota* Dumort. agrupa a las especies tuberíferas, comúnmente conocidas como papas. Esta sección comprende aproximadamente 107 especies silvestres y 4-5 especies cultivadas, dependiendo del criterio taxonómico empleado (Spooner, 2014). El centro de diversidad de las papas silvestres y cultivadas se localiza en los Andes centrales, particularmente en la región que abarca el sur de Perú, Bolivia, y el norte de Argentina, donde la papa fue domesticada hace aproximadamente 8000-10000 años (Spooner, 2005).

La extraordinaria diversidad genética de *Solanum tuberosum* en la región andina representa un recurso de valor incalculable para la agricultura mundial. Esta diversidad incluye variabilidad en resistencia a plagas y enfermedades, tolerancia a estrés abiótico (heladas, sequía, salinidad), adaptación a diferentes condiciones fotoperiódicas y térmicas, calidad nutricional, y características organolépticas (Hawkes, 1990).

Este capítulo examina la biodiversidad genética y taxonomía del género *Solanum tuberosum*, organizando las especies según sus niveles de ploidía, analizando las relaciones evolutivas, y discutiendo las implicaciones para el mejoramiento genético y la conservación de recursos fitogenéticos.

## **3.2. Taxonomía y Clasificación de *Solanum tuberosum***

### **3.2.1. Historia de la Clasificación Taxonómica**

La clasificación taxonómica de las papas ha experimentado numerosas revisiones desde las primeras descripciones de Linneo en el siglo XVIII. Los trabajos pioneros de taxonomía de papas fueron realizados por Bukasov (1933), Hawkes (1956, 1990), y posteriormente por Hawkes y Hjerting (1969, 1989), quienes establecieron sistemas de clasificación basados en características morfológicas, distribución geográfica, y compatibilidad reproductiva (Hawkes, 1990).

Hawkes reconoció inicialmente 7 series taxonómicas dentro de la sección *Petota*: *Tuberosa*, *Morelliformia*, *Circaeifolia*, *Piurana*, *Ingaefolia*, *Cuneoalata*, y *Longipedicellata*, basándose principalmente en características florales, distribución geográfica, y cruzabilidad. Sin embargo, estudios moleculares posteriores han demostrado que algunas de estas series no

son monofiléticas, requiriendo revisión taxonómica (Spooner, 2014).

Los avances en biología molecular, particularmente el uso de marcadores de ADN (RAPDs, AFLPs, microsatélites, secuencias nucleotídicas), han revolucionado la comprensión de las relaciones filogenéticas en *Solanum tuberosum*. Estos estudios han permitido resolver controversias taxonómicas, identificar especies crípticas, y establecer relaciones evolutivas más precisas (Jacobs, 2008).

El sistema de clasificación actualmente más aceptado, propuesto por Spooner y colaboradores (2014), reconoce 4 clados principales dentro de *Solanum* sección *Petota*: Clado 1 (especies del sur de Sudamérica y México), Clado 2 (especies mexicanas y centroamericanas), Clado 3 (especies mexicanas), y Clado 4 (especies de América del Sur) (Spooner, 2014).

### **3.2.2. Nomenclatura de Especies Cultivadas**

La nomenclatura de las papas cultivadas ha sido objeto de considerable debate y revisión. Tradicionalmente, se reconocían 7-8 especies cultivadas: *S. tuberosum* (incluyendo subespecies *tuberosum* y *andigena*), *S. phureja*, *S. stenotomum*, *S. goniocalyx*, *S. ajanhuiri*, *S. juzepczukii*, y *S. curtilobum* (Hawkes, 1990).

Sin embargo, estudios morfológicos, citogenéticos y moleculares han demostrado que existe un continuo de variación entre muchas de estas “especies”, con frecuente flujo genético y ausencia de barreras reproductivas claras. Esto ha llevado a propuestas de consolidación taxonómica (Spooner, 2007).

El sistema actualmente recomendado reconoce las siguientes especies cultivadas:

- *Solanum tuberosum* L. subsp. *tuberosum*: papa cultivada tetraploide de distribución mundial, derivada de *S. tuberosum* subsp. *andigena* mediante selección para adaptación a días largos.
- *Solanum tuberosum* L. subsp. *andigena*: papas tetraploides cultivadas en los Andes, grupo de días cortos.
- *Solanum stenotomum* Juz. & Bukasov: papas diploides cultivadas en los Andes.
- *Solanum phureja* Juz. & Bukasov: papas diploides con período de dormancia muy corto.
- *Solanum ajanhuiri* Juz. & Bukasov: papa diploide cultivada exclusivamente en Bolivia, híbrido entre especies diploides cultivadas y *S. megistacrolobum*.
- *Solanum juzepczukii* Bukasov: papa triploide cultivada, híbrido entre *S. tuberosum* subsp. *andigena* (4x) y *S. stenotomum* (2x) o especies silvestres diploides.
- *Solanum curtilobum* Juz. & Bukasov: papa pentaploide cultivada, probablemente derivada de hibridación entre *S. juzepczukii* (3x) y *S. tuberosum* subsp. *andigena* (4x).

### 3.3. Complejidad Ploídica en Solanum

#### 3.3.1. Series Poliploides y Evolución del Genoma

Una característica notable de Solanum sección Petota es la existencia de una serie poliploide compleja, con especies que abarcan desde diploides ( $2n=2x=24$ ) hasta hexaploides ( $2n=6x=72$ ), siendo el número cromosómico básico  $x=12$  (Matsubayashi, 1991).

La poliploidía ha desempeñado un rol central en la evolución y diversificación de las papas. Los poliploides pueden originarse por dos mecanismos principales: autopoliploidía (multiplicación del mismo genoma) o alopoliploidía (hibridación entre especies seguida de duplicación cromosómica). En Solanum tuberífero, ambos mecanismos han contribuido a la diversidad de ploidías observada (Jansky, 2006).

La poliploidía confiere varias ventajas potenciales incluyendo heterosis (vigor híbrido), amortiguamiento genético contra mutaciones deletéreas (redundancia génica), mayor variabilidad genética para selección, y la posibilidad de subfuncionalización o neofuncionalización de genes duplicados. En papas, la poliploidía ha sido asociada con mayor tolerancia a estreses abióticos, particularmente bajas temperaturas (Jansky, 2006).

La distribución de niveles de ploidía muestra patrones geográficos y ecológicos. Las especies diploides ( $2x$ ) predominan en zonas de altitud media (2500-3500 msnm), las tetraploides ( $4x$ ) tienen amplia distribución altitudinal, mientras que las triploides ( $3x$ ) y pentaploides ( $5x$ ) cultivadas están restringidas al altiplano

(3800-4500 msnm) donde su tolerancia superior a heladas confiere ventajas adaptativas (Ochoa, 1990).

### 3.3.2. Citogenética y Apareamiento Cromosómico

Los estudios citogenéticos han sido fundamentales para comprender las relaciones genómicas en *Solanum tuberosum*. El análisis del apareamiento cromosómico durante la meiosis permite determinar si los poliploides son auto o alopoliploides, y establecer relaciones genómicas entre especies (Matsubayashi, 1991).

En autotetraploides, como *S. tuberosum* subsp. *andigena*, se observa apareamiento multivalente durante la meiosis (formación de trivalentes y cuadrivalentes), indicando homología entre los cuatro genomas. Este apareamiento multivalente resulta en herencia tetrasómica, donde un locus puede tener hasta cuatro alelos diferentes (Ortiz, 1998).

En contraste, alopoliploides como *S. juzepczukii* (triploide) y *S. curtilobum* (pentaploide) muestran apareamiento predominantemente bivalente, con formación ocasional de trivalentes, indicando diferentes grados de homología entre los genomas componentes. Estos patrones de apareamiento afectan la fertilidad, la segregación genética, y las estrategias de mejoramiento aplicables (Matsubayashi, 1991).

El análisis de configuraciones meióticas en híbridos interespecíficos ha permitido asignar fórmulas genómicas a las especies. Por ejemplo, el genoma de diploides cultivados se designa como AA, el de tetraploides cultivados como AAAA (autotetraploide), el de tri-



ploides como AAB (alotriploide con dos genomas de especies cultivadas y uno de especie silvestre), y el de pentaploides como AAAAAA o AABBBB dependiendo de su origen (Matsubayashi, 1991).

### **3.4. Especies Diploides ( $2n=2x=24$ )**

Las especies diploides de *Solanum tuberosum* son particularmente valiosas para el mejoramiento genético debido a que exhiben segregación mendeliana simple, facilitando el mapeo genético, la identificación de genes de interés, y la transferencia de caracteres a niveles superiores de ploidía mediante cruzamientos con poliploides o mediante manipulación de ploidía (Jansky, 2006).

#### **3.4.1. Especies Diploides Cultivadas**

##### ***Solanum stenotomum***

Los tubérculos de *S. stenotomum* presentan amplia variabilidad en color de piel (blanco, amarillo, rojo, morado) y color de pulpa (blanco, amarillo, morado). El contenido de materia seca es típicamente alto (22-28%), haciéndolos adecuados para procesamiento en chuño y otros productos deshidratados tradicionales (Huaman, 1980).

Citogenéticamente, *S. stenotomum* funciona como diploide con apareamiento bivalente regular. Presenta fertilidad variable, con algunos clones altamente fértiles y otros con fertilidad reducida. Esta variación puede reflejar diferentes niveles de consanguinidad o presencia de genes de esterilidad (Hawkes, 1990).

## **Solanum phureja**

*S. phureja* se cultiva principalmente en Colombia, Ecuador y Venezuela, entre 2000 y

3500 msnm. Se caracteriza por ausencia o período muy corto de dormancia de tubérculos, lo que permite múltiples ciclos de cultivo por año en condiciones apropiadas (Estrada, 2000).

Las plantas de *S. phureja* son típicamente compactas, con hojas de 5-7 folíolos, flores blancas o ligeramente coloreadas, y escasa producción de semilla sexual debido a esterilidad masculina frecuente. Los tubérculos son generalmente pequeños a medianos, con formas redondeadas u ovoides, y colores diversos (Estrada, 2000).

El contenido de materia seca en *S. phureja* es típicamente menor (16-20\%) comparado con otras especies cultivadas, resultando en textura cerosa después de cocción. Esta característica es apreciada para ciertos usos culinarios pero limita su aptitud para procesamiento industrial. El sabor es frecuentemente descrito como suave y mantecoso (Estrada, 2000).

Genéticamente, *S. phureja* ha sido extensivamente utilizado en mejoramiento debido a su habilidad para cruzarse con especies tetraploides mediante gametos no reducidos ( $2n$ ), produciendo descendencia triploide o tetraploide. Esta característica ha permitido la introgresión de genes de especies silvestres a germoplasma cultivado (Jansky, 2006).

### ***Solanum ajanhuiri***

*S. ajanhuiri* es una papa diploide cultivada exclusivamente en las orillas del lago Titicaca en Bolivia, entre 3800 y 4100 msnm. Es notable por su excepcional tolerancia a heladas, permitiendo su cultivo en áreas donde otras especies diploides no prosperan (Raker, 2000).

Morfológicamente, *S. ajanhuiri* se caracteriza por plantas pequeñas, hojas con pubescencia densa, flores pequeñas púrpuras, y tubérculos generalmente alargados con ojos profundos. El color de piel varía de amarillo a morado, y la pulpa es típicamente amarilla o crema (Raker, 2000).

Estudios citogenéticos y moleculares han demostrado que *S. ajanhuiri* es un híbrido alotetraploide entre especies cultivadas diploides (*S. stenotomum* o *S. phureja*) y la especie silvestre *S. megistacrolobum*, que aporta genes de tolerancia a heladas. A pesar de ser alotetraploide en origen, *S. ajanhuiri* se comporta citológicamente como diploide con apareamiento bivalente, sugiriendo divergencia significativa entre los genomas componentes (Raker, 2000).

### **3.4.2. Especies Diploides Silvestres Relevantes**

#### ***Solanum chacoense***

*S. chacoense* es una especie silvestre diploide con amplia distribución en Sud-américa, desde Brasil y Paraguay hasta Argentina y Chile. Presenta notable adaptabilidad, encontrándose desde el nivel del mar hasta 3500 msnm en diversos tipos de hábitats (Jansky, 2009).

Esta especie ha sido intensamente estudiada como modelo para investigación genética y fisiológica en papa. *S. chacoense* presenta autoincompatibilidad gametofítica, facilitando el mantenimiento de líneas altamente heterocigotas. Es altamente fértil, produce abundante semilla sexual, y se cruza fácilmente con especies cultivadas diploides (Jansky, 2009). *S. chacoense* es fuente de resistencia a numerosas enfermedades incluyendo tizón tardío *Phytophthora infestans*, varios virus (PVX, PVY), nematodos (*Globodera* spp.), y bacterias. Adicionalmente, presenta tolerancia a sequía y altas temperaturas, características valiosas en el contexto de cambio climático (Jansky, 2009).

### ***Solanum commersonii***

*S. commersonii* es una especie diploide silvestre distribuida en el sur de Brasil, Uruguay y Argentina, típicamente en áreas bajas y húmedas. Es notable por su excepcional tolerancia a las heladas, pudiendo sobrevivir a temperaturas de -10 °C sin sufrir daño letal (Chen, 1999).

La tolerancia a heladas en *S. commersonii* involucra múltiples mecanismos incluyendo acumulación de azúcares (sacarosa, rafinosa), modificaciones en la composición lipídica de membranas celulares, y expresión de proteínas protectoras contra frío (dehidrinas, proteínas de choque frío). Estos mecanismos han sido extensivamente estudiados y algunos genes han sido transferidos a germoplasma cultivado (Chen, 1999).

*S. commersonii* ha sido utilizado en programas de

mejoramiento mediante hibridación con especies diploides cultivadas, aunque frecuentemente presenta barreras de incompatibilidad que requieren técnicas especiales (cultivo de embriones, uso de puentes genéticos) para obtener híbridos viables (Chen, 1999).

### ***Solanum demissum***

*S. demissum* es una especie silvestre hexaploide ( $2n=6x=72$ ) originaria de México y Guatemala, cultivada en zonas de altitud entre 2500 y 3500 msnm. Ha sido la fuente más importante de genes de resistencia a tizón tardío (*Phytophthora infestans*) en programas de mejoramiento de papa a nivel mundial (Hawkes, 1990). *S. demissum* porta al menos 11 genes de resistencia vertical (race-específica) al tizon tardío, designados como R1 a R11. Estos genes confieren resistencia de tipo hipersensitiva contra razas específicas del patógeno. Aunque la resistencia de genes R individuales puede ser superada por nuevas razas del patógeno, el uso de piramidación de múltiples genes R proporciona resistencia más duradera (Fry, 2008).

La transferencia de genes de resistencia desde *S. demissum* ( $6x$ ) a papa cultivada ( $4x$ ) ha sido facilitada por la formación de gametos no reducidos ( $2n$ ) en híbridos pentaploides intermedios. Esta estrategia de mejoramiento ha permitido la incorporación exitosa de genes de resistencia en numerosos cultivares comerciales (Hawkes, 1990).

## **3.5. Especies Tetraploides ( $2n=4x=48$ )**

Las especies tetraploides representan el nivel de ploidía más común en papas cultivadas y silvestres, incluyendo la papa culti-

vada de distribución mundial *S. tuberosum* subsp. *tuberosum* y sus ancestros andinos (Spooner, 2007).

### 3.5.1. *Solanum tuberosum* subsp. *andigena*

*S. tuberosum* subsp. *andigena* (Juz. Bukasov) Hawkes comprende las papas tetraploides cultivadas en los Andes, caracterizadas por requerir fotoperiodos cortos (12 horas) para tuberizar eficientemente. Se distribuyen desde Venezuela hasta el norte de Argentina, con máxima diversidad en Perú y Bolivia, entre 2800 y 4200 msnm (Huaman, 1983).

Esta subespecie presenta extraordinaria variabilidad morfológica, con miles de variedades tradicionales (landraces) diferenciadas por características de planta, flor, y especialmente tubérculo. Los tubérculos exhiben diversidad en forma (redondeada, ovoide, alargada, comprimida), tamaño (desde 20 g hasta más de 500 g), color de piel (blanco, amarillo, rosado, rojo, morado, negro, o combinaciones), color de pulpa (blanco, crema, amarillo, morado), profundidad de ojos, textura, y características culinarias (Huaman, 1983).

El contenido de materia seca en tubérculos de *S. tuberosum* subsp. *andigena* varía ampliamente (18-30\%), siendo generalmente superior al de cultivares modernos de *S. tuberosum* subsp. *tuberosum*. Variedades con alto contenido de materia seca son preferidas para procesamiento en chuño, tunta, y otros productos deshidratados tradicionales (Huaman, 1983).

Citogenéticamente, *S. tuberosum* subsp. *andigena* es autotetraploide con herencia tetrasómica. El apareamiento

miento cromosómico durante la meiosis es predominantemente tetravalente, resultando en segregación compleja que dificulta el mejoramiento mediante selección fenotípica simple. Sin embargo, esta herencia tetrasómica también proporciona gran flexibilidad genética, permitiendo acumulación de múltiples alelos favorables en un locus (Ortiz, 1998).

### **3.5.2. *Solanum tuberosum* subsp. *Tuberosum***

*S. tuberosum* subsp. *tuberosum* L. es la papa cultivada de distribución mundial, adaptada a condiciones de día largo y responsable de aproximadamente 370 millones de toneladas de producción anual global (FAO, 2020).

Esta subespecie se originó de *S. tuberosum* subsp. *andigena* mediante selección para capacidad de tuberización bajo días largos, probablemente en el sur de Chile (Isla de Chiloé) donde las poblaciones nativas habían sido expuestas a fotoperiodos más largos durante generaciones. La introducción a Europa en el siglo XVI involucró un cuello de botella genético severo, con estimaciones de que tan solo 1-3 introducciones fundaron la población europea (Spooner, 2005).

Los cultivares modernos de *S. tuberosum* subsp. *tuberosum* son resultado de intensa selección para características como rendimiento, uniformidad de tubérculos, resistencia a enfermedades, aptitud para procesamiento industrial, y calidad organoléptica. Sin embargo, la base genética de cultivares modernos es relativamente estrecha, haciéndolos vulnerables a nuevas razas de patógenos y estreses ambientales emergentes (Bamberg, 2010).

La reintroducción de diversidad genética desde germoplasma andino (particularmente *S. tuberosum* subsp. *andigena*) ha sido una estrategia importante en el mejoramiento moderno de papa. Esto ha permitido incrementar la base genética, incorporar resistencias a enfermedades, y mejorar características de calidad como contenido de antioxidantes y compuestos bioactivos (Jansky, 2006).

### 3.5.3. Especies Tetraploides Silvestres

Existen numerosas especies silvestres tetraploides distribuidas a lo largo de los Andes, muchas de las cuales representan recursos valiosos para mejoramiento. Especies como *S. acaule*, *S. oplocense*, y *S. albicans* presentan tolerancia excepcional a heladas, mientras que otras como *S. stoloniferum* y *S. polytrichon* son fuentes de resistencia a tizón tardío (Hawkes, 1990).

*S. acaule* Bitter es particularmente notable por su distribución en altitudes extremas (hasta 4500 msnm) y su tolerancia a heladas severas. Esta especie presenta modificaciones morfológicas y fisiológicas para tolerancia a frío incluyendo hojas pubescentes que reducen pérdida de calor por radiación, acumulación de pigmentos antocianicos que protegen contra radiación UV, y metabolismo modificado que permite función fotosintética a temperaturas bajas (Estrada, 2000).

La incorporación de tolerancia a heladas desde especies silvestres tetraploides a germoplasma cultivado ha sido relativamente exitosa debido a la compatibilidad sexual directa. Sin embargo, caracteres indeseables frecuentemente ligados (tubérculos amargos debido a



glicoalcaloides, fotosensibilidad extrema, tubérculos pequeños) requieren múltiples ciclos de retrocruzamiento para obtener materiales agronómicamente aceptables (Jansky, 2006).

### **3.6. Especies Triploides ( $2n=3x=36$ )**

Las especies triploides en *Solanum* tuberífero son exclusivamente cultivadas y representan innovaciones de los agricultores andinos para producción en condiciones de altiplano extremo. La triploidía resulta generalmente en esterilidad o fertilidad reducida debido a desequilibrios cromosómicos durante la meiosis (Matsubayashi, 1991).

#### **3.6.1. *Solanum juzepczukii***

Esta especie es notable por su excepcional tolerancia a heladas, permitiendo producción en áreas donde heladas nocturnas ocurren durante prácticamente todo el año. La tolerancia a heladas de *S. juzepczukii* deriva de su parentesco con especies silvestres tolerantes a frío, probablemente *S. acaule* o *S. megistacrolobum* (Ochoa, 1990).

Los tubérculos de *S. juzepczukii* son típicamente alargados, con colores que varían de amarillo a morado oscuro, frecuentemente con patrones jaspeados. Una característica distintiva es el alto contenido de glicoalcaloides (solanina, chaconina), que confiere sabor amargo y requiere procesamiento especial antes del consumo humano (Johns, 1986).

El procesamiento tradicional de *S. juzepczukii* en chuño negro involucra exposición a ciclos de congelamiento nocturno y descongelamiento diurno

durante varios días, seguido de pisado para eliminar agua y alcaloides solubles, y secado final. Este proceso ancestral reduce el contenido de glicoalcaloides a niveles seguros y produce un alimento estable que puede almacenarse durante años (Johns, 1986).

Citogenéticamente, *S. juzepczukii* muestra apareamiento cromosómico predominantemente bivalente más un univalente, aunque ocasionalmente se forman trivalentes. La fertilidad del polen y óvulos es reducida pero suficiente para propagación sexual limitada. Los agricultores típicamente propagan *S. juzepczukii* vegetativamente mediante tubérculos (Matsubayashi, 1991).

Estudios moleculares sugieren que *S. juzepczukii* se originó mediante hibridación entre *S. tuberosum* subsp. *andigena* (4x) y especies diploides cultivadas o silvestres, posiblemente *S. stenotomum* (2x), seguida de fertilización con gametos no reducidos. El genoma triploide puede representarse aproximadamente como AAB, con dos genomas de tipo cultivado (AA) y uno de especie silvestre o diploide cultivado (B) (Spooner, 2007).

### **3.7. Especies Pentaploides ( $2n=5x=60$ )**

#### **3.7.1. *Solanum curtilobum***

Similar a *S. juzepczukii*, *S. curtilobum* presenta tolerancia excepcional a heladas y alto contenido de glicoalcaloides, requiriendo procesamiento en chuño antes del consumo. Sin embargo, *S. curtilobum* es morfológicamente distinguible por características de planta (mayor vigor, hojas más grandes) y tubércu-

los (tendencia a formas más redondeadas) (Ochoa, 1990).

El origen de *S. curtilobum* probablemente involucró hibridación entre *S. juzepczukii* (3x) y *S. tuberosum* subsp. *andigena* (4x), resultando en un pentaploide con fórmula genómica aproximada AAABB o AAAAB dependiendo del tipo de gametos involucrados. Esta hipótesis es sustentada por análisis citogenéticos y moleculares (Spooner, 2007).

Citogenéticamente, *S. curtilobum* muestra apareamiento cromosómico complejo con formación predominante de bivalentes pero también trivalentes, cuadrivalentes y ocasionalmente pentavalentes. La fertilidad es extremadamente baja, con producción muy limitada de semilla viable. La propagación es exclusivamente vegetativa en la práctica agrícola (Matsumabayashi, 1991).

### **3.8. Conservación de Recursos Genéticos**

#### **3.8.1. Importancia de la Conservación**

La conservación de la diversidad genética de *Solanum tuberosum* es crítica por múltiples razones. Esta diversidad representa: (1) un reservorio de genes para resistencia a estreses bióticos y abióticos esenciales para el mejoramiento genético, (2) un patrimonio cultural de comunidades andinas que han desarrollado y mantenido esta diversidad durante milenios, (3) un componente fundamental de la agrobiodiversidad global con valor intrínseco, y (4) una fuente potencial de nuevos cultivos o productos para mercados especializados (Brush, 2004).

La erosión genética en papas nativas andinas ha sido documentada extensivamente, causada por factores como sustitución por variedades modernas, migración rural-urbana, cambios en preferencias alimentarias, fragmentación de hábitats de especies silvestres, y cambio climático que desplaza zonas agroecológicas (Zimmerer, 2003).

### **3.8.2. Estrategias de Conservación Ex Situ**

La conservación ex situ involucra el mantenimiento de germoplasma fuera de su hábitat natural, en bancos de germoplasma especializados. Los principales repositorios de germoplasma de papa incluyen el Centro Internacional de la Papa (CIP) en Lima, Perú, que mantiene más de 4500 accesiones de especies cultivadas y silvestres, y colecciones nacionales en países andinos (Hijmans, 2003).

Los métodos de conservación ex situ para papa incluyen:

- Conservación de campo: Mantenimiento de plantas en colecciones vivas mediante propagación vegetativa periódica. Este método permite caracterización y evaluación continua pero es costoso, laborioso, y expone el material a riesgos de pérdida por enfermedades o desastres.
- Conservación in vitro: Mantenimiento de plantas en cultivo de tejidos bajo condiciones controladas. Permite almacenamiento en espacios reducidos y facilita intercambio internacional libre de patógenos. El crecimiento lento inducido mediante reducción de temperatura o

adición de inhibidores de crecimiento permite intervalos de subcultivo de 12-18 meses.

- Criopreservación: Almacenamiento de meristemos o embriones somáticos en nitrógeno líquido ( $-196^{\circ}\text{C}$ ), deteniendo todos los procesos metabólicos. Proporciona conservación teóricamente indefinida con mínimo mantenimiento, aunque requiere protocolos específicos para cada especie y no todas las accesiones sobreviven el proceso.
- Conservación de semilla: Aplicable solo a especies o genotipos que producen semilla sexual viable. La semilla puede almacenarse en condiciones de baja temperatura y humedad durante décadas. Este método es particularmente importante para especies silvestres con semilla ortodoxa.

### 3.8.3. Conservación In Situ y On Farm

La conservación in situ de especies silvestres involucra protección de poblaciones en sus hábitats naturales mediante establecimiento de áreas protegidas, reservas genéticas, o corredores biológicos. Este enfoque permite evolución continua en respuesta a presiones selectivas cambiantes, manteniendo procesos evolutivos dinámicos (Maxted, 2002).

La conservación on farm o en finca, se refiere al mantenimiento de variedades tradicionales por agricultores en sus sistemas productivos. Este enfoque reconoce a los agricultores como custodios activos de la agrobiodiversidad y busca proporcionar incentivos (econó-

nicos, sociales, culturales) para continuar cultivando variedades tradicionales (Brush, 2004).

Programas exitosos de conservación on farm en los Andes han implementado estrategias como:

- Desarrollo de mercados especializados para papas nativas con diferenciación por calidad, origen geográfico, o características especiales (denominaciones de origen, certificaciones orgánicas).
- Promoción de usos culinarios tradicionales y nuevos mediante ferias gastronómicas, restaurantes novoandinos, y campañas de revalorización cultural.
- Fortalecimiento de conocimientos tradicionales mediante escuelas de campo de agricultores y diálogo intergeneracional.
- Establecimiento de sistemas de semilla participativos que permiten a agricultores multiplicar y distribuir semilla de calidad de variedades tradicionales.
- Pagos por servicios ecosistémicos que compensan a agricultores por mantener agrobiodiversidad.

#### **3.8.4. Caracterización y Documentación**

La caracterización exhaustiva del germoplasma conservado es esencial para su utilización efectiva en mejoramiento y otras aplicaciones. La caracterización incluye descriptores morfológicos, agronómicos, de

calidad, de resistencia a estreses, y moleculares (Hijmans, 2003).

Los descriptores morfológicos estandarizados desarrollados por CIP y UPOV permiten documentar sistemáticamente características de planta, inflorescencia, tubérculo y semilla. Estos descriptores facilitan la identificación de duplicados en colecciones, la detección de mezclas varietales, y la selección preliminar de material para usos específicos (Huaman, 1977).

La caracterización molecular mediante marcadores de ADN (microsatélites, SNPs) permite evaluar la diversidad genética, establecer relaciones filogenéticas, identificar genotipos duplicados con mayor precisión, y realizar estudios de genética de asociación para identificar genes responsables de características de interés (Ghislain, 2009).

Las bases de datos integradas que combinan información de pasaporte (origen, colector), caracterización morfológica, evaluación agronómica, y datos moleculares, facilitan la búsqueda eficiente de germoplasma con características específicas para programas de mejoramiento. El Sistema de Información de Recursos Genéticos (SINGER) del CIP y el Genesys global portal son ejemplos de estas plataformas integradas (Hijmans, 2003).

### **3.9. Implicaciones para el Mejoramiento Genético**

La extraordinaria diversidad de *Solanum tuberosum* constituye un recurso invaluable para el mejoramiento genético de papa. Las estrategias de mejoramiento deben considerar la complejidad ploídica, las barreras de incompatibilidad, y los objetivos

específicos según el mercado objetivo (Jansky, 2006).

El mejoramiento de papa cultivada tetraploide enfrenta desafíos únicos debido a la herencia tetrasómica. Los métodos tradicionales de selección fenotípica son menos eficientes que en cultivos diploides debido a que caracteres recesivos pueden estar enmascarados por múltiples alelos dominantes. Estrategias modernas incluyen selección genómica, que utiliza miles de marcadores moleculares para predecir el valor genético de individuos, incrementando la eficiencia de selección (Ortiz, 1998).

La introgresión de genes desde especies silvestres requiere frecuentemente estrategias complejas debido a barreras de incompatibilidad. Los métodos empleados incluyen:

- Uso de especies puente que son compatibles tanto con especies silvestres como cultivadas.
- Manipulación de ploidía mediante gametos no reducidos ( $2n$ ) o poliploidización con colchicina.
- Técnicas de rescate de embriones mediante cultivo in vitro.
- Hibridación somática mediante fusión de protoplastos.
- Técnicas modernas de edición genómica (CRISPR/Cas9) que permiten modificaciones precisas sin necesidad de cruzamientos sexuales.

El futuro del mejoramiento de papa se beneficiará enormemente de la integración de genómica, fenotipado de alto rendimiento, modelamiento predictivo, y técnicas de mejoramiento participativo que involucran a agricultores en la selección de materiales adaptados a sus condiciones específicas y preferencias (Jansky, 2006).



# Almidones: Caracterización, Extracción y Eficiencia

### 4.1. Introducción a los Almidones Nativos

El almidón es el polisacárido de reserva más importante en plantas superiores y constituye la principal fuente de carbohidratos en la dieta humana, representando aproximadamente 80-90\% de todos los carbohidratos consumidos globalmente (Tester, 2004). Desde la perspectiva agroindustrial, los almidones son ingredientes fundamentales en múltiples sectores incluyendo alimentación, farmacéutica, textil, papel, adhesivos y materiales biodegradables (BeMiller, 2009).

Los almidones de tubérculos y raíces andinas presentan características fisicoquímicas y funcionales distintivas que los diferencian de almidones convencionales de cereales (maíz, trigo, arroz) o tubérculos tropicales (yuca, camote). Estas características incluyen tamaño granular, morfología, contenido de amilosa/amilopectina, temperatura de gelatinización, propiedades reológicas, y claridad de pasta, que determinan su aplicabilidad en diferentes procesos industriales (Hoover, 2001).

La caracterización exhaustiva de almidones nativos de cultivos andinos no solo proporciona información fundamental para su valorización industrial, sino que también contribuye al rescate

y conservación de germoplasma con propiedades funcionales superiores. Variedades tradicionales que han sido marginadas por razones agronómicas o comerciales pueden contener almidones con características excepcionales para aplicaciones especializadas (Singh, 2003).

Este capítulo examina la estructura y composición de almidones, los métodos de caracterización fisicoquímica, las técnicas de extracción aplicables a escala laboratorio e industrial, los factores que afectan el rendimiento de extracción, y las propiedades funcionales específicas de almidones de tubérculos y raíces andinas.

## **4.2. Estructura y Composición del Almidón**

### **4.2.1. Composición Molecular: Amilosa y Amilopectina**

El almidón está compuesto por dos tipos de polímeros de glucosa: amilosa y amilopectina, cuyas proporciones relativas determinan en gran medida las propiedades funcionales del almidón (Tester, 2004).

La amilosa es un polímero esencialmente lineal de unidades de D-glucosa unidas mediante enlaces glucosídicos  $\alpha(1\rightarrow4)$ . La estructura es helicoidal, con típicamente 6 residuos de glucosa por vuelta de hélice. El grado de polimerización de la amilosa varía entre 500 y 6000 unidades de glucosa, correspondiendo a pesos moleculares de aproximadamente  $10^5$  a  $10^6$  Da (BeMiller, 2009).

Aunque la amilosa es predominantemente lineal, evidencia experimental indica que contiene algunas ramificaciones  $\alpha(1\rightarrow6)$ , típicamente una por cada

500-2000 residuos de glucosa. Estas ramificaciones pueden afectar significativamente las propiedades de la amilosa, particularmente su capacidad de formar complejos con lípidos y su susceptibilidad a retrogradación (Tester, 2004).

La amilopectina es un polímero altamente ramificado de D-glucosa, con cadenas lineales de enlaces  $\alpha(1\rightarrow4)$  y puntos de ramificación  $\alpha(1\rightarrow6)$  que ocurren aproximadamente cada 20-25 residuos de glucosa. La amilopectina es una de las macromoléculas naturales más grandes conocidas, con grados de polimerización que alcanzan  $10^4$  a  $10^5$  unidades de glucosa y pesos moleculares de 107 a 109 Da (BeMiller, 2009).

La estructura de la amilopectina puede describirse mediante el modelo de racimos propuesto por French (1972) y refinado por Hizukuri (1986). En este modelo, las cadenas de amilopectina se clasifican según su longitud y posición:

**Cadenas A:** cadenas externas no ramificadas, unidas a través de su extremo reductor a una cadena B.

**Cadenas B:** cadenas que portan una o más cadenas A y están a su vez unidas a otras cadenas B o a la única cadena C.

**Cadena C:** la única cadena que contiene el extremo reductor de la molécula de amilopectina.

La proporción amilosa:amilopectina varía considerablemente entre especies y variedades. Los almidones normales de papa contienen típicamente 20-30 % de amilosa, mientras que almidones cerosos (waxy) pue-

den contener menos de 1\% de amilosa, y almidones de alto contenido de amilosa pueden superar 70\% (Hoover, 2001).

#### **4.2.2. Organización Granular del Almidón**

El almidón se biosintetiza y almacena en forma de gránulos semicristalinos en amiloplastos. Los gránulos de almidón presentan estructura jerárquica que abarca desde la organización molecular nanométrica hasta la morfología granular micrométrica, (Perez, 2009).

A nivel molecular, las cadenas de amilopectina se organizan formando estructuras cristalinas mediante formación de dobles hélices entre cadenas paralelas. Estas dobles hélices se empaquetan formando lamelas cristalinas que alternan con lamelas amorfas ricas en puntos de ramificación, creando una periodicidad de aproximadamente 9-10 nm detectable por difracción de rayos X de bajo ángulo (SAXS) (Perez, 2009).

A nivel supramolecular, los gránulos de almidón exhiben anillos de crecimiento semicristalinos y amorfos que alternan radialmente desde el hilum (centro) hacia la periferia del gránulo. Estos anillos, observables mediante microscopía óptica con luz polarizada como una cruz de Malta característica, resultan de variaciones diurnas en las tasas de deposición de almidón durante el desarrollo del órgano de almacenamiento (Tester, 2004).

Los gránulos de almidón pueden presentar dos tipos principales de cristalinidad según el patrón de difracción de rayos X:

**Tipo A:** característico de almidones de cereales, con empaquetamiento denso de dobles hélices y contenido de agua de aproximadamente 4 moléculas por unidad cristalina.

**Tipo B:** característico de almidones de tubérculos, con empaquetamiento menos denso y mayor contenido de agua (36 moléculas por unidad cristalina).

**Tipo C:** patrón intermedio que representa mezcla de cristalitos tipo A y B, común en leguminosas.

Los almidones de papa y otros tubérculos andinos típicamente presentan patrón tipo B, con temperaturas de gelatinización superiores a almidones tipo A de contenido de amilosa similar (Hoover, 2001).

#### 4.2.3. Componentes Menores del Almidón

Además de amilosa y amilopectina, los gránulos de almidón nativos contienen componentes menores incluyendo lípidos, proteínas, y minerales que, aunque presentes en bajas concentraciones (típicamente <1% en almidones de tubérculos), pueden influenciar significativamente las propiedades funcionales (Be-Miller, 2009).

Los lípidos en almidones de tubérculos son predominantemente fosfolípidos (lisofosfatidilcolina, fosfatidilcolina) localizados en la superficie de gránulos o formando complejos de inclusión con amilosa. Estos lípidos pueden afectar la temperatura de gelatinización, la viscosidad de pasta, y la susceptibilidad a retrogradación (Morrison, 1995).

Las proteínas asociadas a gránulos de almidón incluyen enzimas residuales de biosíntesis (almidón sintasas, enzimas ramificantes) y proteínas estructurales. En papa, proteínas como la granule-bound starch synthase (GBSS) permanecen asociadas a gránulos maduros. El contenido proteico es típicamente 0.1-0.5% en almidones de tubérculos bien purificados (Hoover, 2001).

Los grupos fosfato están presentes en concentraciones significativas en almidones de papa (0.1-0.2% base seca), unidos covalentemente a residuos de glucosa en las posiciones C-3 o C-6. Estos grupos fosfato, negativamente cargados a pH neutro, incrementan la repulsión entre cadenas de amilopectina durante la gelatinización, resultando en mayor capacidad de hinchamiento, mayor viscosidad de pico, y mayor claridad de pasta comparado con almidones de cereales (Lim, 1994).

## **4.3. Métodos de Caracterización de Almidones**

### **4.3.1. Morfología y Tamaño Granular**

La morfología y distribución de tamaño de gránulos de almidón son características importantes que afectan las propiedades funcionales y aplicaciones industriales. Los métodos de caracterización incluyen microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (SEM), y difracción láser (Lindeboom, 2004).

La microscopía óptica permite observación rápida de forma, tamaño y características superficiales de gránulos. Los gránulos suspendidos en agua o glicerina se observan con aumentos de 400-1000x. El uso de luz

polarizada permite visualizar la cruz de Malta característica que indica cristalinidad y orientación radial de moléculas en el gránulo (Lindeboom, 2004).

La microscopía electrónica de barrido (SEM) proporciona imágenes de alta resolución de la superficie de gránulos, permitiendo observar detalles topográficos como fisuras, poros, canales y rugosidad superficial. Las muestras se fijan sobre soportes metálicos y se recubren con oro o platino mediante sputtering antes de observación. Magnificaciones típicas son 500-5000x (Lindeboom, 2004).

El análisis de distribución de tamaño se realiza mediante difracción láser (Coulter, Malvern Mastersizer), que permite cuantificar la distribución de tamaños en poblaciones de miles de gránulos. Los parámetros reportados incluyen diámetro medio, mediana, moda, y percentiles (D10, D50, D90). Los gránulos de papa presentan distribución bimodal con población de gránulos grandes (20-100  $\mu\text{m}$ ) y pequeños (<20  $\mu\text{m}$ ) (Lindeboom, 2004).

#### **4.3.2. Contenido de Amilosa**

La determinación del contenido de amilosa es fundamental para predecir propiedades funcionales del almidón. Los métodos más utilizados incluyen el método yodométrico y la separación mediante cromatografía de exclusión por tamaño (Morrison, 1995).

El método yodométrico se basa en la formación de complejos azules entre yodo y amilosa, cuya absorbancia se mide espectrofotométricamente a 620-640 nm. El procedimiento típico involucra:

- Dispersión del almidón (100 mg) en dimetilsulfóxido (DMSO) 90% (v/v) mediante calentamiento a 85°C durante 15 minutos.
- Dilución de alícuota con agua destilada.
- Adición de solución de yodo-yoduro de potasio.
- Medición de absorbancia a 620 nm después de 15 minutos.
- Cálculo del contenido de amilosa mediante curva de calibración con amilosa y amilopectina puras.

El contenido de amilosa se calcula mediante la ecuación:

$$Amilosa (\%) = \frac{A_{620} - A_{blanco}}{m \times k} \times 100$$

donde  $A_{620}$  es la absorbancia de la muestra,  $A_{blanco}$  es la absorbancia del blanco,  $m$  es la masa de almidón (g), y  $k$  es la pendiente de la curva de calibración.

Limitaciones del método incluyen interferencia de lípidos endógenos que forman complejos con yodo, y la dificultad de dispersar completamente almidones resistentes. El contenido de amilosa aparente determinado por este método puede diferir del contenido real debido a ramificaciones en amilosa y cadenas largas en amilopectina (Morrison, 1995).



### 4.3.3. Propiedades Térmicas: Calorimetría Diferencial de Barrido

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) permite caracterizar las transiciones térmicas del almidón durante la gelatinización. El análisis proporciona información sobre temperatura de inicio de gelatinización ( $T_o$ ), temperatura de pico ( $T_p$ ), temperatura de conclusión ( $T_c$ ), y entalpía de gelatinización ( $\Delta H$ ) (Liu, 2006).

El procedimiento típico de DSC involucra:

- Preparación de suspensión de almidón en agua destilada con relación almidón:agua de 1:2 o 1:3 (p/p).
- Sellado hermético de la suspensión (10-20 mg) en cápsulas de aluminio.
- Equilibración a temperatura ambiente durante 2-24 horas.
- Calentamiento desde 20°C hasta 120°C a tasa de 10°C/min en calorímetro diferencial.
- Registro del flujo de calor en función de la temperatura.

La entalpía de gelatinización se calcula integrando el área bajo el endoterma:

$$\Delta H = \frac{\text{Área del pico (J)}}{m_{\text{almidon seco (g)}}$$

Los almidones de papa típicamente presentan  $T_o = 56-66^{\circ}\text{C}$ ,  $T_p = 62-68^{\circ}\text{C}$ ,  $T_c = 68-75^{\circ}\text{C}$ , y  $\Delta H = 15-20$  J/g. El rango de gelatinización ( $T_c - T_o$ ) indica la homogeneidad de la población de cristalitos: rangos estrechos sugieren cristalitos de tamaño y perfección similares (Liu, 2006).

#### 4.3.4. Propiedades de Pasta: Viscografía

Las propiedades viscoamilográficas del almidón durante calentamiento en exceso de agua se determinan mediante analizadores de viscosidad como el Rapid Visco Analyser (RVA) o el Brabender Viscoamilógrafo (Newport, 2016).

El perfil típico de RVA involucra:

- Mezcla de almidón (3 g, base 14 % humedad) en agua destilada (25 mL) en contenedor de aluminio.
- Equilibración a  $50^{\circ}\text{C}$  durante 1 minuto con agitación a 960 rpm.
- Calentamiento desde  $50^{\circ}\text{C}$  hasta  $95^{\circ}\text{C}$  a  $12^{\circ}\text{C}/\text{min}$  (agitación reducida a 160 rpm).
- Mantenimiento a  $95^{\circ}\text{C}$  durante 2.5 minutos.
- Enfriamiento desde  $95^{\circ}\text{C}$  hasta  $50^{\circ}\text{C}$  a  $12^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .
- Mantenimiento a  $50^{\circ}\text{C}$  durante 2 minutos.

Los parámetros registrados incluyen:

- **Viscosidad de pico:** viscosidad máxima alcanzada durante calentamiento, indicador de capacidad de hinchamiento de gránulos.
- **Temperatura de pasta:** temperatura a la cual se detecta incremento inicial en viscosidad, relacionada con temperatura de gelatinización.
- **Breakdown:** diferencia entre viscosidad de pico y viscosidad mínima durante mantenimiento a 95°C, indicador de estabilidad de gránulos a esfuerzo mecánico y temperatura.
- **Viscosidad final:** viscosidad al final del enfriamiento, indicador de tendencia a retrogradación y formación de geles.
- **Setback:** diferencia entre viscosidad final y viscosidad de pico, indicador de retrogradación durante enfriamiento.

Los almidones de papa presentan viscosidades de pico muy altas (>300 RVU), break-down elevado (gránulos frágiles), y setback moderado comparado con almidones de cereales (Hoover, 2001).

#### 4.3.5. Propiedades Reológicas de Pastas y Geles

La caracterización reológica de pastas y geles de almidón proporciona información sobre comportamiento de flujo, viscoelasticidad, y propiedades texturales relevantes para aplicaciones alimentarias (Morris, 1990).

La medición de propiedades de flujo se realiza me-

diente reómetros rotacionales, aplicando gradiente de velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) y midiendo el esfuerzo de corte resultante ( $\tau$ ). El comportamiento se describe mediante modelos reológicos:

Fluido newtoniano:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

donde  $\eta$  es la viscosidad dinámica (Pa·s).

Fluido pseudoplástico (ley de potencia):

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$$

donde  $K$  es el índice de consistencia (Pa·s<sup>n</sup>) y  $n$  es el índice de comportamiento de flujo (adimensional). Valores de  $n < 1$  indican comportamiento pseudoplástico (adelgazamiento por corte).

Las pastas de almidón de papa típicamente exhiben comportamiento pseudoplástico, con valores de  $n$  entre 0.3 y 0.6, indicando fuerte adelgazamiento por corte (Morris, 1990).

Las propiedades viscoelásticas se determinan mediante ensayos oscilatorios, donde se aplica deformación sinusoidal y se mide el esfuerzo resultante. Los parámetros obtenidos incluyen:

- Módulo de almacenamiento ( $G'$ ): componente elástica, indicador de energía almacenada.
- Módulo de pérdida ( $G''$ ): componente viscosa, indicador de energía disipada.

- Tangente de pérdida ( $\tan \delta = G''/G'$ ): razón entre componentes viscosa y elástica.

Los geles de almidón de papa presentan valores de  $G'$  relativamente bajos (102-103 Pa) comparados con almidones de cereales, indicando geles débiles. La relación  $G' > G''$  confirma comportamiento predominantemente elástico característico de geles (Morris, 1990).

## 4.4 Extracción de Almidón: Fundamentos y Metodologías

### 4.4.1. Principios de la Extracción de Almidón

La extracción de almidón de tubérculos y raíces se basa en la liberación de gránulos de almidón mediante ruptura mecánica de tejidos, seguida de separación del almidón de otros componentes celulares (fibra, proteínas solubles, azúcares) mediante procesos de tamizado, sedimentación, y lavado (Moorthy, 2002).

Los pasos fundamentales en la extracción incluyen:

Preparación de materia prima: lavado, pelado (opcional), troceado.

Desintegración: ruptura de tejidos mediante rallado, trituration, o molienda para liberar gránulos de almidón.

Separación primaria: remoción de fibra gruesa mediante tamizado.

Sedimentación: separación de almidón de líquido

sobrenadante conteniendo proteínas solubles y azúcares.

Lavado: remoción de impurezas residuales mediante resuspensión y sedimentaciones repetidas.

Deshidratación: remoción de agua por centrifugación o filtración.

Secado: reducción de humedad a niveles de almacenamiento (10-14 %) mediante secado con aire caliente.

#### **4.4.2. Métodos de Extracción a Escala Laboratorio**

La extracción de almidón a escala laboratorio se emplea para caracterización de variedades, estudios de factores que afectan el rendimiento y calidad, y obtención de muestras para análisis (Singh, 2003).

- Lavar tubérculos con agua corriente para remover tierra adherida.
- Pelar manualmente (opcional, dependiendo del objetivo del estudio).
- Pesar cantidad conocida de tubérculos (500-1000 g).
- Trocear en cubos de aproximadamente 2 cm.
- Licuar con agua destilada (relación tubérculo:agua de 1:2 p/v) en licuadora doméstica o industrial durante 3-5 minutos.
- Filtrar la suspensión a través de tamices de malla

decreciente (250, 150, 75  $\mu\text{m}$ ) para remover fibra.

- Dejar sedimentar el filtrado en recipientes cilíndricos durante 3-4 horas.
- Decantar cuidadosamente el sobrenadante.
- Resuspender el sedimento en agua destilada, agitar, y dejar sedimentar nuevamente.
- Repetir el lavado 3-5 veces hasta obtener sobrenadante claro.
- Remover la capa superior (proteínas) del sedimento final.
- Secar el almidón a 40°C en estufa con circulación de aire durante 24-48 horas.
- Moler el almidón seco y tamizar a través de malla 100 (150  $\mu\text{m}$ ).
- Almacenar en recipientes herméticos a temperatura ambiente.

El rendimiento de almidón se calcula como:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{m_{\text{almidon seco}}}{m_{\text{tubérculos frescos}}} \times 100$$

#### 4.4.3. Extracción Industrial de Almidón de Papa

La extracción industrial de almidón de papa es un proceso continuo altamente optimizado que procesa toneladas de tubérculos por hora. El proceso típico incluye las siguientes etapas (Bergthaller, 2004):

1. **Recepción y almacenamiento:** Los tubérculos se reciben en la planta durante la época de cosecha (típicamente 2-4 meses), se limpian de tierra y piedras, y se almacenan en silos o bodegas con control de temperatura y ventilación.
2. **Lavado:** Los tubérculos se lavan en lavadoras rotatorias o de tambor con agua recirculada. Los sistemas modernos emplean separación de tierra por flotación y ciclones.
3. **Rallado:** Los tubérculos se desintegran en molinos de martillo, ralladores de disco, o raspadores. El equipo debe maximizar la ruptura celular minimizando el daño a gránulos de almidón. La velocidad de rallado típica es 200-400 rpm.
4. **Extracción y separación de fibra:** La suspensión de rallado se tamiza en baterías de tamices curvos (DSM screens) o tamices rotatorios para separar fibra y almidón libre. Los tamices tienen aberturas de 100-250  $\mu\text{m}$ . La fibra separada (pulpa) se prensa y se vende como alimento animal.
5. **Separación de proteínas:** El licor de almidón se procesa en ciclones (hydrocyclones) que separan almidón de agua de proceso conteniendo proteínas solubles (agua de fruto). Los ciclones operan



con alimentación tangencial que genera separación centrífuga: el almidón (más denso) se descarga por el fondo (underflow) mientras las proteínas se descargan por el tope (overflow).

- 6. Refinación:** El almidón se refina mediante lavado contracorriente en series de 8-12 etapas de ciclos. El agua fresca se introduce en la última etapa y fluye en dirección opuesta al almidón, maximizando la eficiencia de lavado.
- 7. Deshidratación:** El almidón refinado (40-45\% de sólidos) se deshidrata en centrífugas de canasta o decantadores continuos hasta 60-65\% de sólidos.
- 8. Secado:** El almidón se seca en secadores flash (secado instantáneo mediante contacto con aire caliente a 130-180°C durante 1-2 segundos) o secadores de lecho fluidizado hasta humedad final de 18-20\%.
- 9. Molienda y empaque:** El almidón seco se pulveriza en molinos de martillo y se empaca en sacos de 25-50 kg o en big bags de 500-1000 kg.

El rendimiento industrial de almidón de papa es típicamente 16-18\% (base fresca), equivalente a 75-85% del almidón teórico contenido en los tubérculos. Las pérdidas ocurren principalmente en agua de proceso, pulpa residual, y gránulos dañados removidos durante refinación (Bergthaller, 2004).

#### **4.4.4. Extracción de Almidón de Otros Tubérculos Andinos**

La extracción de almidón de tubérculos andinos menores (oca, olluco, mashua) se realiza siguiendo principios similares a papa, aunque con adaptaciones específicas debidas a diferencias en composición y propiedades de los tubérculos (Hoover, 2001).

##### **Consideraciones para oca:**

El alto contenido de mucílagos en oca puede dificultar la sedimentación del almidón. Se recomienda:

- Rallado fino para maximizar liberación de gránulos pequeños.
- Adición de enzimas pectinolíticas (0.1-0.2 %) para reducir viscosidad.
- Centrifugación en lugar de sedimentación por gravedad.
- Lavado con solución de NaOH diluido (0.1 %) seguido de neutralización para remover oxalatos superficiales.

##### **Consideraciones para olluco**

El alto contenido de mucílagos y bajo contenido de almidón (comparado con papa) requieren:

- Tratamiento enzimático con celulasas y pectinasas.

Múltiples ciclos de lavado (6-8) para obtener almidón puro.

- Secado a temperatura moderada (<50°C) debido al pequeño tamaño granular que incrementa susceptibilidad a gelatinización.
- Los glucosinolatos presentes en mashua pueden interferir con la extracción:
- Lavado inicial de tubérculos rallados con agua para lixiviar glucosinolatos solubles.
- Inactivación de mirosinasa mediante escaldado breve antes del rallado (opcional).
- Extracción en medio ligeramente ácido (pH 5-6) para minimizar hidrólisis de glucosinolatos.

## **4.5. Factores que Afectan el Rendimiento de Extracción**

### **4.5.1. Factores Relacionados con la Materia Prima**

El contenido de almidón en tubérculos varía según la variedad, condiciones de cultivo, madurez fisiológica, y condiciones de almacenamiento postcosecha (Tester, 2004).

La variedad es determinante del contenido de materia seca y almidón. En papa, variedades para procesamiento industrial contienen típicamente 20-24 % de materia seca y 14-18 % de almidón (base fresca), mientras que variedades de consumo directo pueden

contener 16-20\% de materia seca (Burton, 1989).

Las condiciones de cultivo afectan significativamente la acumulación de almidón. Temperaturas nocturnas frescas (12-15°C) favorecen mayor acumulación por reducción de respiración. Disponibilidad hídrica adecuada durante tuberización incrementa tanto el rendimiento de tubérculos como el contenido de materia seca. Fertilización potásica (K) incrementa el contenido de almidón y mejora la calidad de extracción (Ewing, 1995).

La madurez fisiológica influye en el contenido de almidón y las características de los gránulos. Tubérculos inmaduros contienen menos almidón y mayor proporción de azúcares reductores. La cosecha debe realizarse cuando el follaje ha senesced completamente y la peridermis se ha desarrollado adecuadamente (Tester, 2004).

El almacenamiento postcosecha puede afectar el contenido y calidad del almidón. Temperaturas de almacenamiento inferiores a 8°C inducen conversión de almidón a azúcares (endulzamiento por frío), reduciendo el rendimiento de almidón extraíble. Almacenamiento prolongado puede incrementar la degradación enzimática de gránulos de almidón (Burton, 1989).

#### **4.5.2. Factores del Proceso de Extracción**

La eficiencia de extracción está determinada por parámetros del proceso incluyendo grado de desintegración, relación agua:tubérculo, temperatura, pH, y número de lavados (Moorthy, 2002).

El grado de desintegración afecta la liberación de gránulos. Rallado muy grueso resulta en células intactas que retienen almidón, mientras que rallado excesivamente fino puede romper gránulos de almidón. El tamaño óptimo de partícula es 0.5-2 mm (Bergthaller, 2004).

La relación agua:tubérculo influye en la eficiencia de separación. Relaciones bajas (<1:1) resultan en suspensiones viscosas difíciles de tamizar, mientras que relaciones muy altas (>3:1) diluyen excesivamente el almidón incrementando volúmenes de procesamiento. La relación óptima es típicamente 1.5:1 a 2:1 (p/v) (Moorthy, 2002).

La temperatura de extracción debe mantenerse baja (<20°C) para prevenir gelatinización de gránulos y activación de enzimas amilolíticas. Sistemas industriales frecuentemente emplean enfriamiento del agua de proceso (Bergthaller, 2004).

El pH del medio de extracción afecta la estabilidad de gránulos y la solubilización de proteínas. pH neutro a ligeramente ácido (6.0-7.0) es óptimo para extracción de almidón de papa. pH alcalino puede causar hinchamiento de gránulos y solubilización de proteínas superficiales (Moorthy, 2002).

## **4.6. Propiedades Funcionales de Almidones de Tubérculos Andinos**

### **4.6.1. Almidón de Papa**

El almidón de papa presenta propiedades funcionales distintivas que lo hacen valioso para múltiples aplicaciones industriales (Hoover, 2001):

Estas propiedades hacen al almidón de papa adecuado para aplicaciones que requieren alta viscosidad, claridad, y textura suave, como sopas, salsas, productos de panadería, recubrimientos, y adhesivos (Hoover, 2001).

**Tamaño granular:** Los granulos presentan distribución bimodal con población grande (20-100  $\mu$ m, diámetro medio 30-40  $\mu$ m) y pequeña (20  $\mu$ m). Los gránulos grandes dominan en masa (90 %).

**Morfología:** Forma ovoide a esférica con superficie lisa. Algunos gránulos presentan hilum excéntrico visible.

**Contenido de amilosa:** 20-30 % en variedades normales. Existen mutantes waxy (1%) y alto amilosa (40%).

**Contenido de fosfato:** 0.1-0.2 % (base seca), el más alto entre almidones comerciales.

Los grupos fosfato están unidos principalmente en posición C-6 de glucosa.

**Temperatura de gelatinización:** 56-66°C (inicio), 62-68 °C (pico). Relativamente baja comparada con almidones de cereales.

**Entalpía de gelatinización:** 15-20 J/g, indicando alto grado de cristalinidad.

**Viscosidad de pico:** Muy alta ( 300 R VU), resultado del alto contenido de fosfato que incrementa la repulsión electrostática durante el hinchamiento.

**Claridad de pasta:** Excelente, debido a baja tendencia a asociación de amilosa. La transmitancia a 640 nm de pastas al 2 % es típicamente del 90 %.

Estabilidad al congelamiento-descongelamiento:

Pobre, con alta sinéresis debido a retrogradación de amilosa

**Formación de gel:** Geles débiles comparados con almidones de cereales. El módulo elástico ( $G'$ ) a 6 % de concentración es típicamente 200-500 Pa. Estas propiedades hacen al almidón de papa adecuado para aplicaciones que requieren alta viscosidad, claridad, y textura suave, como sopas, salsas, productos de panadería, recubrimientos, y adhesivos (Hoover, 2001).

#### 4.6.2. Almidón de Oca

El almidón de oca presenta características distintivas (Hoover, 2001):

**Tamaño granular:** gránulos muy pequeños (2-25  $\mu\text{m}$ , diámetro medio 8-12  $\mu\text{m}$ ).

**Morfología:** Forma poligonal irregular, muy diferente de almidones típicos de tubérculos

**Contenido de amilosa:** 20-24 %, similar a papa.

**Temperatura de gelatinización:** 68-72°C, superior a papa debido posiblemente a mayor perfección cristalina.

**Viscosidad de pico:** Moderada (150-200 RVU), inferior a papa pero superior a almidones de cereales.

**Claridad de pasta:** Buena (transmitancia 75-85 % a 640 nm).

Estabilidad a congelamiento: Superior a papa debido

al pequeño tamaño granular que reduce separación de fases.

El pequeño tamaño granular confiere propiedades texturales únicas, con aplicaciones potenciales en productos que requieren textura suave y cremosa sin granulosidad, como cremas, postres congelados, y productos de panadería libres de gluten (Hoover, 2001).

#### 4.6.2. Almidón de Olluco

Las propiedades del almidón de olluco han sido menos estudiadas pero presentan características interesantes (Hoover, 2001):

**Tamaño granular:** Gránulos muy pequeños (1-9 m), los más pequeños entre tubérculos conocidos.

**Morfología:** Ovoide a esférica, superficie lisa.

**Contenido de amilosa:** 22-26%.

**Temperatura de gelatinización:** 56-62 ➡ C, en el rango inferior para almidones de tubérculos.

**Viscosidad de pico:** Baja a moderada (100-150 RVU).

Estabilidad a ciclos de congelamiento-descongelamiento: Excelente, con mínima sinéresis. Esta propiedad es atribuible al tamaño granular extremadamente pequeño.

**Digestibilidad:** Alta digestibilidad enzimática debido al pequeño tamaño que incrementa área superficial.



El almidón de olluco tiene potencial para productos congelados, formulaciones farmacéuticas (debido a alta digestibilidad), y como espesante en productos que requieren textura muy fina (Hoover, 2001).

#### 4.6.4. Almidón de Mashua

El almidón de mashua comparte características con papa pero presenta algunas diferencias (Hoover, 2001):

**Tamaño granular:** 10-40 m, diámetro medio 20-25 m.

**Morfología:** Ovoide a elipsoidal, similar a papa.

**Contenido de amilosa:** 18-24%.

**Temperatura de gelatinización:** 58-64 ➡ C.

**Viscosidad de pico:** 250-300 RVU, ligeramente inferior a papa.

**Claridad de pasta:** Buena (transmitancia 80-90 %).

Una característica notable es la presencia de trazas de glucosinolatos asociados al almidón, que requieren lavado exhaustivo para su remoción completa si se destina a aplicaciones alimentarias, Hoover 2001.

### 4.7. Modificación de Almidones para Aplicaciones Especializadas

Los almidones nativos, aunque versátiles, frecuentemente requieren modificación para optimizar propiedades para aplicaciones específicas. Las principales categorías de modificación incluyen física, química, y enzimática, BeMiller 2009.

#### 4.7.1. Modificaciones Físicas

**Pregelatinización:** Consiste en gelatinizar el almidón mediante calentamiento en exceso de agua, seguido de secado. El almidón pregelatinizado es soluble en agua fría, útil en productos instantáneos (pures, sopas).

**Tratamiento térmico-húmedo (heat-moisture treatment):** Calentamiento de almidón a 100-120 °C con humedad controlada (15-30 %) durante varias horas. Modifica la estructura cristalina sin gelatinizar, incrementando temperatura de gelatinización y reduciendo capacidad de hinchamiento.

**Recocido (annealing):** Incubación de almidón en exceso de agua a temperatura superior al inicio de gelatinización pero inferior al pico, durante periodos prolongados. Perfecciona cristallitos, incrementa temperatura de gelatinización y entalpía.

#### 4.7.2. Modificaciones Químicas

**Esterificación:** Introducción de grupos 'éster (acetato, fosfato) que reducen retrogradación, incrementan claridad, y mejoran estabilidad a congelamiento.

**Eterificación:** Sustitución con grupos hidroxipropilo u otros que incrementan solubilidad, reducen retrogradación, y mejoran claridad.

**Entrecruzamiento:** Formación de enlaces covalentes entre cadenas mediante reactivos bifuncionales (tri-metafosfato, epiclорhidrina). Incrementa resistencia al calor, ácidos, y esfuerzo mecánico.

**Hidrólisis acida:** Tratamiento con ácidos diluidos que rompe preferentemente regiones amorfas, produciendo almidones de baja viscosidad útiles en confitería.

#### 4.7.3. Modificaciones Enzimáticas

**Hidrólisis enzimática:** Uso de amilasas (-amilasa, -amilasa, glucoamilasa) para producir dextrinas, maltodextrinas, o jarabes de glucosa.

**Ramificación:** Uso de enzimas ramificantes para introducir puntos de ramificación adicionales, modificando propiedades de gelatinización y retrogradación.

**Desramificación:** Uso de isoamilasas o pululanases para remover ramificaciones, incrementando contenido de amilosa aparente y promoviendo formación de almidón resistente.

La selección de la modificación apropiada depende de la aplicación final y las propiedades del almidón nativo. Los almidones de tubérculos andinos, con sus propiedades únicas, ofrecen oportunidades para desarrollo de productos modificados especializados con características superiores para nichos de mercado específicos (BeMiller, 2009).



# Procesos Tecnológicos en Raíces y Almidones

## 5.1. Introducción a la Transformación Agroindustrial

La transformación agroindustrial de raíces reservantes y tubérculos andinos representa una estrategia fundamental para la agregación de valor, la reducción de pérdidas postcosecha, la diversificación de productos, y el desarrollo de sistemas alimentarios resilientes y sostenibles (Fellows, 2009). Los procesos tecnológicos aplicables abarcan desde métodos tradicionales ancestrales que han asegurado la conservación de alimentos durante siglos, hasta tecnologías modernas que permiten la obtención de ingredientes funcionales y productos de alto valor agregado (Satin, 2006).

La región andina posee un rico patrimonio de tecnologías tradicionales de procesamiento desarrolladas durante milenios para preservar tubérculos en condiciones de limitada disponibilidad de combustible, ausencia de refrigeración, y necesidad de almacenamiento prolongado. El chuño y la tunta (papas deshidratadas por liofilización natural), la papa seca (papa cocida y deshidratada), y diversos fermentados representan innovaciones tecnológicas pre-hispánicas que continúan siendo relevantes en la actualidad (Werge, 1979).

Simultáneamente, el desarrollo de tecnologías modernas de procesamiento ha abierto nuevas oportunidades para la valorización de tubérculos y raíces andinas. La extrusión permite la producción de snacks expandidos, cereales para desayuno, y harinas precocidas. La microencapsulación protege compuestos bioactivos sensibles. Las tecnologías de membrana permiten la concentración y purificación de componentes funcionales. La modificación controlada de almidones genera ingredientes con propiedades específicas para aplicaciones industriales (Brennan, 2006).

Este capítulo examina los principales procesos tecnológicos aplicables a raíces reservantes y tubérculos andinos, organizados en categorías según el principio de conservación o transformación empleado: procesos térmicos, deshidratación, fermentación, extrusión, y modificación de almidones. Para cada proceso se discuten los fundamentos científicos, las operaciones unitarias involucradas, los efectos sobre la calidad nutricional y sensorial, y las aplicaciones específicas para cultivos andinos.

## **5.2. Procesamiento Tradicional Andino**

### **5.2.1. Producción de Chuño Negro**

El chuño negro es el producto de la deshidratación de papa por liofilización natural, aprovechando las condiciones climáticas del altiplano donde ocurren ciclos diarios de congelamiento nocturno y descongelamiento diurno durante la estación seca (Werge, 1979).

El proceso tradicional involucra las siguientes etapas:

- 1. Selección de la materia prima:** Se utilizan preferentemente variedades amargas (principal-

mente *S. juzepczukii* y *S. curtilobum*) con alto contenido de glicoalcaloides. La cosecha se realiza después de las primeras heladas, cuando los tubérculos han acumulado máxima materia seca.

2. **Exposición a congelamiento:** Los tubérculos se distribuyen en capas delgadas sobre el suelo (típicamente en áreas conocidas como “chuño huasi”) durante la noche, cuando las temperaturas descienden a -5 a -10°C. El agua intracelular se congela formando cristales que rompen las paredes celulares.
3. **Descongelamiento y pisado:** Durante el día, cuando las temperaturas suben por encima de 0°C, los tubérculos se descongelan. Los tubérculos se pisan descalzos para exprimir el agua liberada y los glicoalcaloides solubles. Este pisado se repite durante varios días.
4. **Deshidratación final:** Los tubérculos se exponen al sol durante 5-7 días adicionales hasta alcanzar humedad de 10-15 %. El producto final es arrugado, de color negro o café oscuro, y tiene textura dura.

Los mecanismos de conservación en el chuño incluyen:

- Reducción de actividad de agua ( $a_w$ ) a niveles inferiores a 0.60, inhibiendo crecimiento microbiano.
- Inactivación enzimática por congelamiento y deshidratación.

- Remoción parcial de glicoalcaloides (reducción de 60-80 %) mediante lixiviación durante pisado.
- Modificación de almidón que reduce digestibilidad enzimática, incrementando contenido de almidón resistente.

El chuño puede almacenarse durante años sin deterioro significativo. Antes del consumo, se rehidrata mediante cocción prolongada (1-2 horas), durante la cual recupera textura suave aunque con sabor y color diferentes de papa fresca (Werge, 1979).

### 5.2.2. Producción de Tunta (Chuño Blanco)

La tunta es un producto similar al chuño pero que involucra una etapa adicional de remojo en agua corriente (ríos, canales) durante 20-30 días después del congelamiento inicial. Este remojo prolongado lixivia completamente los glicoalcaloides y pigmentos, resultando en un producto de color blanco o crema, sabor suave, y ausencia de amargor (Christiansen, 1977).

El proceso de tunta involucra:

- Congelamiento nocturno de tubérculos durante 3-5 noches.
- Pisado para romper tejidos y facilitar lixiviación.
- Remojo en corrientes de agua (pozas especialmente construidas) durante 20-30 días. El agua se renueva constantemente por flujo natural.



- Secado final al sol durante 7-10 días.
- La tunta presenta ventajas nutricionales sobre el chuño negro:
- Ausencia total de glicoalcaloides (reducción 95%).
- Color blanco atractivo.
- Sabor suave sin amargor.
- Textura más suave después de cocción.

Sin embargo, el proceso de tunta requiere mayor tiempo y acceso a agua corriente, limitando su producción a áreas específicas del altiplano. Adicionalmente, el remojo prolongado causa pérdidas significativas de nutrientes solubles (vitaminas, minerales, proteínas), reduciendo el valor nutricional comparado con chuño negro (Christiansen, 1977).

### 5.2.3. Papa Seca (Choqollo)

La papa seca es un producto tradicional obtenido mediante cocción de tubérculos seguida de pelado manual y secado al sol. A diferencia del chuño, que utiliza variedades amargas, la papa seca se elabora con variedades dulces (*S. tuberosum* subsp. *andigena*) (Werge, 1979).

El proceso incluye:

- Cocción de tubérculos enteros en agua hirviendo durante 20-40 minutos (dependiendo del tamaño).

- Enfriamiento y pelado manual mientras están tibios.
- Corte en mitades o rodajas (opcional).
- Secado al sol durante 5-8 días hasta humedad de 10-12 %.

La cocción previa gelatiniza el almidón, lo que facilita la rehidratación posterior y mejora la digestibilidad. El producto final puede almacenarse durante varios meses y se utiliza principalmente en sopas y guisos tradicionales.

Una ventaja de la papa seca sobre el chuño es la retención de nutrientes (vitaminas, minerales) que se pierden durante el remojo en la elaboración de tunta. Sin embargo, requiere combustible para la cocción, lo que ha limitado históricamente su producción en áreas con escasez de leña (Werge, 1979).

## **5.3. Deshidratación Moderna**

### **5.3.1. Fundamentos de la Deshidratación**

La deshidratación es un método de conservación basado en la reducción del contenido de agua a niveles que inhiben el crecimiento microbiano y reducen la actividad enzimática. La preservación se logra cuando la actividad de agua ( $a_w$ ) se reduce por debajo de 0.60, nivel en el cual la mayoría de microorganismos no pueden proliferar (Rahman, 2007).

La actividad de agua se relaciona con el contenido de humedad mediante isoterma de sorción, que des-

criben la relación entre  $a_w$  y humedad en equilibrio a temperatura constante. Para tubérculos, la isoterma típicamente sigue el modelo de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer):

$$H = \frac{H_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w)(1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)}$$

donde  $H$  es la humedad en base seca (kg agua/kg sólido seco),  $H_m$  es la humedad de monocapa,  $C$  y  $K$  son constantes relacionadas con energía de sorción.

La cinética de secado describe la velocidad de remoción de humedad en función del tiempo y las condiciones de proceso. Para productos con geometría de lámina plana, la ley de Fick de difusión puede simplificarse como:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$$

donde  $D_{ef}$  es el coeficiente de difusión efectivo de agua ( $m^2/s$ ), que depende de la temperatura según la ecuación de Arrhenius:

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

donde  $D_0$  es el factor pre-exponencial,  $E_a$  es la energía de activación (J/mol),  $R$  es la constante universal de gases (8.314 J/mol·K), y  $T$  es la temperatura absoluta (K).

### 5.3.2. Secado por Aire Caliente

El secado por aire caliente es el método más común de deshidratación industrial. El aire caliente transfiere calor al producto (incrementando su temperatura y proporcionando energía para evaporación de agua) y simultáneamente arrastra el vapor de agua generado (Mujumdar, 2006).

Los secadores de bandeja (tray dryers) son apropiados para procesamiento por lotes de rodajas o cubos de tubérculos. El diseño típico incluye:

- Cámara de secado con bandejas apiladas verticalmente.
- Sistema de calentamiento (eléctrico, gas, vapor) con ventiladores para circulación de aire.
- Control de temperatura y humedad relativa del aire.
- Capacidad típica: 50-500 kg de producto fresco por lote.
- Condiciones óptimas de secado para rodajas de papa (espesor 3-5 mm):
- Temperatura de aire: 60-70°C
- Velocidad de aire: 1.5-2.5 m/s
- Humedad relativa: 10-20 %
- Tiempo de secado: 4-8 horas (hasta humedad final 10-12 %)

Los secadores de túnel permiten operación semicontinua o continua, con producto moviéndose a través de zonas de temperatura controlada. Son apropiados para mayores escalas de producción (1 ton/día).

El producto se distribuye en carros con bandejas que se mueven a través del túnel. El aire caliente puede fluir en la misma dirección que el producto (flujo paralelo) o en dirección opuesta (contracorriente). El flujo contracorriente es más eficiente energéticamente, pero requiere control cuidadoso para evitar sobrecalentamiento del producto seco (Mujumdar, 2006).

El secado a temperaturas elevadas (70°C) puede causar:

- Pardeamiento no enzimático (reacciones de Maillard) entre azúcares reductores y aminoácidos.
- Degradación de vitamina C (pérdidas de 50-80 %).
- Degradación de carotenoides y antocianinas.
- Gelatinización parcial de almidón en superficie, creando capa impermeable que retarda secado.
- Endurecimiento superficial (case hardening).

Para minimizar estos efectos, se recomienda:

- Escaldado previo (inmersión en agua a 90-95°C durante 2-3 minutos) para inactivar enzimas polifenoloxidasas y peroxidasas que causan pardeamiento enzimático.

- Tratamiento con soluciones de bisulfito de sodio (0.1-0.5 %) para prevenir pardeamiento.
- Secado en dos etapas: temperatura inicial moderada (50-60°C) hasta humedad intermedia, seguida de temperatura superior (65-75°C) para secado final.

### 5.3.3. Liofilización

La liofilización o secado por congelamiento es un proceso que remueve agua mediante sublimación directa de hielo a vapor, sin pasar por la fase líquida. Este método preserva excepcionalmente la estructura, color, sabor, y nutrientes del producto, pero es más costoso que el secado convencional (Ratti, 2001).

El proceso de liofilización involucra tres etapas:

**Congelamiento:** El producto se congela rápidamente a -40 a -50°C. La velocidad de congelamiento afecta el tamaño de cristales de hielo: congelamiento rápido genera cristales pequeños con menor daño celular, mientras que congelamiento lento produce cristales grandes que pueden romper estructuras celulares.

**Secado primario:** El producto congelado se coloca en cámara de vacío (presión típica 0.1-0.5 mbar). Se aplica calor moderado (típicamente -10 a +30°C) para proporcionar energía de sublimación. El hielo sublima y el vapor de agua se condensa en placas enfriadas a -50 a -70°C.

La tasa de sublimación está limitada por la trans-

ferencia de calor hacia el frente de sublimación y la transferencia de masa (vapor de agua) desde el frente hacia la cámara de vacío. El tiempo de secado primario típicamente representa 60-80 % del tiempo total de liofilización.

**Secado secundario:** Después de completar la sublimación, se incrementa gradualmente la temperatura (hasta 20-40°C) para remover agua no congelada (agua ligada) mediante desorción. Esta etapa reduce la humedad final a niveles de almacenamiento (2-5 %).

Ventajas de liofilización para tubérculos andinos:

- Retención excelente de nutrientes (vitamina C 90%, antocianinas 85%).
- Preservación de estructura porosa que permite rehidratación rápida y completa.
- Mantenimiento de color, sabor y aroma.
- Estabilidad prolongada a temperatura ambiente sin refrigeración.
- Costos de inversión elevados (equipos especializados).
- Consumo energético alto (10-20 kWh/kg de agua removida, vs. 1-3 kWh/kg para secado por aire).
- Tiempos de proceso prolongados (12-48 horas).

Requiere empaque hermético (preferentemente al vacío o en atmósfera inerte) para prevenir rehidratación y oxidación.

La liofilización es económicamente viable para productos de alto valor agregado como papas nativas pigmentadas, ingredientes funcionales, y aplicaciones farmacéuticas o nutraceuticas (Ratti, 2001.)

#### 5.3.4. Secado Osmótico

El secado osmótico es un pretratamiento que remueve agua parcialmente mediante inmersión del producto en soluciones hipertónicas (azúcar, sal, o polialcoholes), aprovechando el gradiente de potencial químico entre el producto y la solución (Torreggiani, 1993).

Durante la osmosis, ocurren dos flujos principales:

- Flujo de agua desde el producto hacia la solución (deshidratación).
- Flujo de solutos desde la solución hacia el producto (impregnación).

La cinética de deshidratación osmótica puede describirse mediante el modelo de Azuara:

$$\frac{WL_t}{WL_\infty} = \frac{t}{S_1 + S_2 \cdot t}$$

donde  $WL_t$  es la pérdida de peso al tiempo  $t$ ,  $WL_\infty$  es la pérdida de peso en equilibrio, y  $S_1, S_2$  son parámetros del modelo relacionados con la velocidad de deshidratación.



- Solución osmótica: sacarosa 50-60% o cloruro de sodio 15-20%.
- Temperatura: 30-50°C.
- Relación solución:producto: mínimo 5:1 (p/p).
- Tiempo: 2-6 horas.

Agitación moderada para renovar solución en contacto con producto.

El secado osmótico típicamente remueve 30-50% de agua inicial, reduciendo el tiempo de secado posterior por aire caliente en 40-60%. Adicionalmente, la impregnación con azúcar mejora el sabor, incrementa el contenido de sólidos solubles, y puede proteger contra oxidación durante secado final (Torreggiani, 1993).

Para tubérculos andinos pigmentados (papa morada, oca roja), el secado osmótico con soluciones ácidas (pH 3-4) ayuda a estabilizar antocianinas, preservando mejor el color durante el procesamiento (Torreggiani, 1993).

## **5.4. Procesos Térmicos**

### **5.4.1. Cocción y Escaldado**

El escaldado es un tratamiento térmico suave (típicamente 70-100°C durante 1-10 minutos) aplicado a vegetales antes de procesamiento posterior (congelamiento, deshidratación, enlatado). Los objetivos principales son inactivación enzimática y reducción de carga microbiana (Barrett, 2000)

### Método de escaldado:

Escaldado con agua: El producto se sumerge en agua caliente (85-100°C) durante tiempo especificado. Ventajas: transferencia de calor eficiente y uniforme. Desventajas: lixiviación de nutrientes solubles (vitaminas, minerales), generación de efluentes contaminados.

Escaldado con vapor: El producto se expone a vapor saturado (100°C) en cámara cerrada. Ventajas: menores pérdidas de nutrientes solubles, menor consumo de agua. Desventajas: calentamiento menos uniforme, requiere equipos especializados.

### Parámetros de escaldado para papa:

El tiempo de escaldado se determina para alcanzar inactivación completa de peroxidasa, la enzima más termorresistente en papa:

- Agua a 95°C: 3-5 minutos (rodajas 5 mm espesor).
- Vapor a 100°C: 4-6 minutos.

El escaldado insuficiente resulta en oscurecimiento enzimático durante almacenamiento, mientras que el escaldado excesivo causa ablandamiento textural, gelatinización excesiva del almidón, y pérdidas nutricionales.

### Efectos del escaldados:

- Inactivación de enzimas (peroxidasa, polifenoloxidasas, lipoxigenasa).

- Reducción de carga microbiana (1-2 log).
- Remoción parcial de aire intercelular, reduciendo oxidación.
- Ablandamiento textural (gelatinización parcial del almidón, solubilización de pectinas).
- Pérdidas de vitamina C (20-40%), vitaminas B (10-30%).

#### 5.4.2. Esterilización y Pasteurización

La esterilización comercial involucra calentamiento del producto envasado a temperaturas suficientes (típicamente 115-121°C) durante tiempo adecuado para destruir esporas de *Clostridium botulinum* y otros microorganismos patógenos y deteriorantes, asegurando estabilidad microbiológica a temperatura ambiente (Fellows, 2009).

El procesamiento térmico se cuantifica mediante el concepto de valor de esterilización  $F_0$ , definido como el tiempo equivalente de calentamiento a 121°C necesario para alcanzar un nivel de esterilidad especificado:

$$F_0 = \int_0^t 10^{(T-121)/z} dt$$

donde T es la temperatura instantánea (°C), z es el valor z del microorganismo objetivo (típicamente 10°C para *C. botulinum*), y t es el tiempo total de proceso.

Para productos de baja acidez ( $\text{pH} > 4.6$ ) como papa, el  $F_0$  mínimo requerido es 3-5 minutos (reducción de 12 ciclos logarítmicos de esporas de *C. botulinum*).

- Preparación: lavado, pelado (químico o mecánico), cubeteado (1-2 cm).
- Escaldado: agua a  $90^\circ\text{C}$  durante 3 minutos.
- Llenado de latas: cubos de papa + líquido de cobertura (salmuera 2%, o salsas).
- Exhausting: calentamiento en túnel de vapor para remover aire y crear vacío (presión interna 40-50 kPa después de sellado).
- Sellado hermético de latas.
- Esterilización en autoclave:  $115\text{-}121^\circ\text{C}$  durante 30-60 minutos (dependiendo del tamaño de lata).
- Enfriamiento rápido a  $35\text{-}40^\circ\text{C}$ .

El procesamiento térmico severo causa cambios significativos en calidad:

- Ablandamiento textural excesivo (sobrecocción del almidón).
- Pérdidas de vitamina C (50-80%) y vitaminas B (30-60%).
- Desarrollo de sabores cocidos.

- Posible desintegración de piezas en productos con bajo contenido de materia seca.

Para minimizar deterioro de calidad, se prefiere procesamiento UHT-aséptico (ultra-high temperature): calentamiento rápido a 135-150°C durante 2-10 segundos, seguido de enfriamiento rápido y envasado aséptico. Este proceso logra esterilidad comercial con menor daño térmico (Fellows, 2009).

## **5.5. Fermentación**

### **5.5.1. Fermentación Láctica**

La fermentación láctica es un método de conservación basado en la conversión de azúcares en ácido láctico por bacterias lácticas (principalmente *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*). La acidificación resultante ( $\text{pH} < 4.5$ ) inhibe microorganismos patógenos y deteriorantes (Hutkins, 2006). Aunque la fermentación láctica no es tradicional para tubérculos andinos, presenta potencial para desarrollo de productos innovadores. Experiencias en otros contextos (fermentación de yuca en África, fermentación de camote en Asia) demuestran viabilidad técnica y nutricional (Steinkraus, 1996).

- Preparación: papa cocida, triturada o rallada.
- Inoculación: adición de cultivo iniciador de bacterias lácticas (2-5 % v/p) o fermentación espontánea.
- Fermentación: incubación a 30-37°C durante 24-72 horas.

- **Monitoreo:** pH, acidez titulable, población microbiana.
- **Terminación:** cuando pH alcanza 3.8-4.2, se detiene fermentación mediante refrigeración o pasteurización.
- Reducción de pH de 5.8-6.2 a 3.8-4.2.
- Producción de ácido láctico (0.5-1.5 %).
- Desarrollo de sabor ácido característico.
- Incremento de digestibilidad del almidón (hidrólisis parcial por amilasas bacterianas).
- Síntesis de vitaminas del complejo B (especialmente riboflavina).
- Producción de compuestos antimicrobianos (bacteriocinas, peróxido de hidrógeno).
- Bebidas fermentadas tipo “kvass” a partir de papa.
- Productos tipo “sourdough” combinando harinas de tubérculos con fermentación láctica.
- Ingredientes acidificantes naturales para formulaciones alimentarias.

### 5.5.2. Fermentación Alcohólica

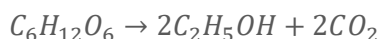
La fermentación alcohólica de tubérculos andinos

para producción de bebidas ha sido documentada desde tiempos precolombinos. La chicha de papa era consumida en algunas regiones andinas, aunque menos común que la chicha de maíz (Cutler, 1960).

El proceso involucra:

- Gelatinización del almidón mediante cocción.
- Sacarificación: conversión de almidón en azúcares fermentables mediante enzimas amilásas (tradicionalmente masticación, actualmente usando enzimas comerciales o malta).
- Inoculación con levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*).
- Fermentación a 20-30°C durante 3-7 días.
- Clarificación y filtración.

La eficiencia de conversión de almidón en etanol depende de la efectividad de sacarificación. El rendimiento teórico de etanol a partir de glucosa es:



con rendimiento másico teórico de 0.511 g etanol/g glucosa. En la práctica, los rendimientos son 85-95% del teórico debido a pérdidas por respiración aeróbica inicial y producción de biomasa de levaduras.

Tubérculos andinos con bajo contenido de azúcares reductores (para minimizar reacciones de Maillard durante cocción) y alto contenido de almidón fácilmente sacarificable son preferibles para fermentación alcohólica (Cutler, 1960).

## 5.6. Extrusión

### 5.6.1. Fundamentos del Proceso de Extrusión

La extrusión es un proceso de cocción a alta temperatura y corto tiempo (HTST) en el cual los materiales alimentarios son forzados a través de un dado (die) bajo condiciones controladas de temperatura, presión y esfuerzo mecánico. El proceso combina simultáneamente mezclado, cocción, texturización, y moldeado (Guy, 2001).

Los componentes principales de un extrusor incluyen:

- **Tolva de alimentación:** donde se dosifica la materia prima.
- **Barril:** cilindro que contiene el tornillo, dividido en zonas de temperatura controlada.
- **Tornillo(s):** elemento(s) rotatorio(s) que transportan, comprimen, mezclan y cocinan el material. Los extrusores pueden ser de tornillo simple o doble.
- **Dado:** abertura al final del barril que determina la forma del producto extruido.



- **Cuchilla:** corta el producto extruido a longitud deseada.
- Durante la extrusión de almidones, ocurren transformaciones moleculares y estructurales importantes:
- Gelatinización completa del almidón.
- Fragmentación de gránulos de almidón y dispersión molecular de amilosa y amilopectina.
- Dextrinización (hidrólisis parcial) dependiendo de la severidad del proceso.
- Formación de complejos amilosa-lípidos.
- Expansión del producto al salir del dado debido a evaporación instantánea de agua (flash-off).

### 5.6.2. Parámetros de Proceso y Efectos sobre Calidad

Los principales parámetros de extrusión que afectan las características del producto incluyen:

**Humedad de alimentación:** Controla el grado de cocción, expansión, y textura. Humedades bajas (12-18\%) favorecen productos expandidos y crujientes (snacks), mientras que humedades altas (25-35\%) producen productos densos (pastas).

**Humedad de barril:** Controla gelatinización de almidón, dextrinización, y reacciones de Maillard. Temperaturas típicas: 120-180°C en zona de cocción.

**Velocidad de tornillo:** Afecta el tiempo de residencia, intensidad de mezclado, y energía mecánica específica (SME). Velocidades típicas: 200-500 rpm.

**Relación de compresión del tornillo:** Determina la presión generada y el grado de cocción. Valores típicos: 2:1 a 4:1.

La energía mecánica específica (SME) cuantifica el trabajo mecánico aplicado al material:

$$SME = \frac{P \cdot N}{Q} = \frac{2\pi \cdot T \cdot N}{Q}$$

donde P es la potencia consumida (W), N es la velocidad del tornillo (rpm), Q es la tasa de alimentación (kg/h), y T es el torque (N·m).

### 5.6.3. Productos Extruidos de Tubérculos Andinos

#### **Snacks expandidos:**

Formulaciones típicas incluyen harina de papa (50-80 %), harina de maíz (0-30%), sal (1-2%), emulsificantes (0.5-1%). Condiciones de extrusión:

- Humedad: 14-18%
- Temperatura de dado: 140-160°C
- Velocidad de tornillo: 300-400 rpm
- Presión en dado: 30-50 bar

El producto expandido presenta estructura alveolar con densidad de 100-200 kg/ms. Después de extrusión, se aplican saborizantes y aceites mediante proceso de coating.

### **Harinas precocidas:**

Utilizadas como ingredientes instantáneos (purés, sopas). Condiciones de extrusión:

- Humedad: 25-30%
- Temperatura: 120-140°C
- Baja expansión (dado restrictivo)

El producto se muele hasta tamaño de partícula fino (100-300  $\mu\text{m}$ ). La gelatinización completa permite rehidratación instantánea en agua o leche caliente.

### **Pasta sin gluten:**

Formulaciones combinan harinas de tubérculos andinos con hidrocoloides (goma xantana, goma guar) para compensar ausencia de gluten. Condiciones de extrusión:

- Humedad: 28-35%
- Temperatura: 90-110°C
- Dados con forma de pasta (spaguetti, macaroni, etc.)

Ventajas de extrusión para tubérculos andinos:

- Versatilidad en desarrollo de productos (snacks, harinas, pastas, cereales).

Procesamiento continuo de alto rendimiento.

- Inactivación de factores antinutricionales (inhibidores de tripsina).
- Mejora de digestibilidad del almidón.
- Reducción de carga microbiana (proceso HTST).
- Posibilidad de fortificación nutricional durante proceso.

#### **Desarrollos:**

- Pérdidas de compuestos termosensibles (vitamina C, antocianinas).
- Necesidad de optimización de formulaciones para cada tipo de tubérculo.
- Inversión inicial en equipamiento especializado.

## **5.7. Modificación de Almidones**

### **5.7.1. Modificación Física**

#### **Tratamiento térmico-húmedo (HMT):**

El HMT involucra calentamiento de almidón con humedad limitada (15-30\%) a temperaturas de 90-

120°C durante 1-16 horas. Las modificaciones estructurales incluyen:

- Incremento de cristalinidad por reorganización de dobles hélices.
- Incremento de temperatura de gelatinización (+5 a +10°C).
- Reducción de capacidad de hinchamiento.
- Incremento de resistencia a hidrólisis enzimática.

El almidón de papa modificado por HMT presenta aplicabilidad en productos que requieren estabilidad a temperatura elevada sin incremento excesivo de viscosidad.

### **Modificación por radiación:**

La irradiación gamma o con haz de electrones puede modificar propiedades de almidones mediante ruptura de enlaces glucosídicos, reduciendo peso molecular y viscosidad. Dosis típicas: 5-50 kGy.

Efectos:

- Reducción de viscosidad de pico.
- Incremento de solubilidad en agua fría.
- Reducción de tendencia a retrogradación.

### 5.7.2. Modificación Química

Almidones acetilados:

La acetilación introduce grupos acetilo mediante reacción con anhídrido acético:



donde St-OH representa un grupo hidroxilo del almidón.

El grado de sustitución (DS) típico para almidones acetilados alimentarios es 0.01-0.20. Los grupos acetilo:

- Reducen puentes de hidrógeno entre cadenas.
- Incrementan claridad de pasta.
- Mejoran estabilidad a congelamiento-descongelamiento.
- Reducen retrogradación.

#### **Almidones hidroxipropilados:**

La hidroxipropilación se realiza con óxido de propileno en medio alcalino. El DS típico es 0.05-0.15.

Propiedades:

- Excelente claridad de pasta.

- Estabilidad superior a congelamiento.
- Viscosidad estable durante almacenamiento.
- Mayor solubilidad en agua fría.

Almidones entrecruzados:

El entrecruzamiento con trimetafosfato de sodio (STMP) o epiclorhidrina forma puentes covalentes entre cadenas de almidón, incrementando resistencia a temperatura, ácidos, y esfuerzo mecánico.

El grado de entrecruzamiento se controla mediante concentración de reactivo y condiciones de reacción. Almidones ligeramente entrecruzados mantienen alta viscosidad durante procesamiento térmico prolongado, siendo útiles en productos enlatados y retortados (BeMiller, 2009).

### 5.7.3. Producción de Almidones Resistentes

Los almidones resistentes (RS) son fracciones de almidón que resisten digestión por amilasas en el intestino delgado, comportándose como fibra soluble con efectos prebióticos y beneficios para salud metabólica (Englyst, 1992).

Existen cuatro tipos principales de RS:

- RS1: Almidón físicamente inaccesible (atrapado en matrices de alimentos integrales).
- RS2: Gránulos de almidón nativo resistentes (almidones de papa, plátano verde).

- RS3: Almidón retrogradado.
- RS4: Almidones químicamente modificados.

### **Producción de RS3 de papa:**

- Gelatinización completa del almidón (calentamiento en exceso de agua a 95-120°C).
- Enfriamiento a 4°C y almacenamiento durante 24-72 horas.
- La amilosa forma estructuras de doble hélice resistentes a digestión enzimática.

El contenido de RS3 puede alcanzar 15-30\% dependiendo de:

- Contenido de amilosa del almidón original (mayor amilosa → mayor RS).
- Número de ciclos de calentamiento-enfriamiento (ciclos repetidos incrementan RS).
- Temperatura y duración del almacenamiento en frío.
- Adición de lípidos que forman complejos con amilosa.

Los almidones resistentes de papa presentan aplicaciones en:



- Alimentos funcionales para control glucémico.
- Productos de panadería con reducción calórica.
- Ingredientes prebióticos que favorecen microbiota intestinal beneficiosa.
- Suplementos dietéticos de fibra soluble.



# Compuestos Bioactivos y Valor Nutraceutico

### 6.1. Introducción a Compuestos Bioactivos en Tubérculos Andinos

Los compuestos bioactivos son constituyentes de los alimentos que, más allá de su función nutricional básica, ejercen efectos fisiológicos beneficiosos sobre la salud humana, incluyendo la prevención de enfermedades crónicas, modulación de respuestas inmunes, actividad antioxidante, y efectos antimicrobianos (Kris-Etherton, 2002). En las últimas décadas, el interés científico y comercial en estos compuestos ha crecido exponencialmente, impulsado por el reconocimiento de que la dieta juega un papel fundamental en la prevención de enfermedades cardiovasculares, diabetes tipo 2, cáncer, y trastornos neurodegenerativos (Liu, 2004).

Los tubérculos y raíces andinas son fuentes ricas y diversas de compuestos bioactivos, incluyendo polifenoles, carotenoides, antocianinas, glucosinolatos, fructooligosacáridos, y péptidos bioactivos. La diversidad genética extraordinaria preservada en variedades tradicionales andinas ha generado un amplio espectro de perfiles fitoquímicos, con algunas variedades conteniendo concentraciones de compuestos bioactivos significativamente superiores a las encontradas en cultivares modernos o en otros cultivos (Andre, 2007).

La caracterización exhaustiva de compuestos bioactivos en tubérculos andinos no solo contribuye a la valoración nutricional y funcional de estos recursos, sino que también proporciona fundamentos para el desarrollo de alimentos funcionales, nutraceuticos, y productos farmacéuticos derivados de germoplasma nativo. Adicionalmente, el conocimiento de estos compuestos permite diseñar estrategias de mejoramiento genético orientadas a incrementar el contenido de fitoquímicos beneficiosos (Brown, 2005).

Este capítulo examina los principales grupos de compuestos bioactivos presentes en tubérculos y raíces andinas, sus propiedades químicas y actividades biológicas, los factores que afectan su contenido y estabilidad, los métodos de extracción y cuantificación, y las aplicaciones potenciales en el desarrollo de productos nutraceuticos y funcionales.

## **6.2. Compuestos Fenólicos**

### **6.2.1. Estructura Química y Clasificación**

Los compuestos fenólicos constituyen uno de los grupos más abundantes y diversos de metabolitos secundarios en plantas, caracterizados por la presencia de al menos un anillo aromático con uno o más grupos hidroxilo. En tubérculos, los fenoles principales incluyen ácidos fenólicos, flavonoides, y antocianinas (Macheix, 2005).

Los **ácidos fenólicos** se clasifican en derivados del ácido benzoico (C6-C1) y derivados del ácido cinámico (C6-C3). En papa, el ácido clorogénico (éster del ácido cafeico con ácido quínico) es el ácido fenólico predominante, representando 50-90% del contenido fenólico total. Otros ácidos fenólicos incluyen ácido cafeico, ácido ferúlico, y sus isómeros y derivados (Friedman, 1997).

La estructura del ácido clorogénico es:

Ácido 5-O-cafeoilquinico (ácido clorogénico)

Los **flavonoides** son compuestos con estructura C6-C3-C6, consistente en dos anillos aromáticos (A y B) unidos por un anillo heterocíclico de tres carbonos (C). Las principales subclases de flavonoides en tubérculos incluyen flavonoles (quercetina, kaempferol), flavonas, y flavanonas, Macheix2005.

Las **antocianinas** son glucósidos de antocianidinas (flavonoides con carga positiva en el oxígeno del anillo C), responsables de pigmentación roja, púrpura, y azul en variedades pigmentadas de papa, oca, y mashua. Las antocianidinas principales en tubérculos andinos son pelargonidina, cianidina, petunidina, delphinidina, peonidina, y malvidina (Lewis, 2000).

### 6.2.2. Contenido en Tubérculos Andinos

El contenido de compuestos fenólicos en tubérculos varía ampliamente según la especie, variedad, tejido, y condiciones de cultivo y almacenamiento (Andre, 2007)

**Papa (*solanum tuberosum*).**

Variedades de pulpa blanca/amarilla: 200-800 mg ácido clorogénico equivalente (ACE)/kg peso fresco. El ácido clorogénico se concentra principalmente en la peridermis y córtex externo, con gradiente decreciente hacia la médula.

Variedades de pulpa pigmentada (roja, morada):

1000-4000 mg ACE/kg peso fresco, incluyendo antocianinas (100-600 mg cianidina-3-glucósido equivalente/kg peso fresco). Las variedades con pigmentación morada intensa como ‘Vitelotte’, ‘Purple Majesty’, y variedades nativas andinas pueden superar 2000 mg de antocianinas/kg (Brown, 2005).

### **Oca (*Oxalis tuberosa*)**

El contenido fenólico total varía de 300-1500 mg ACE/kg, con variedades rojas y moradas conteniendo 200-800 mg de antocianinas/kg. Los principales compuestos incluyen ácido clorogénico, cianidina-3-glucósido, y derivados acilados de antocianinas (Campos, 2006).

### **Mashua (*Tropaeolum tuberosum*)**

Contenido fenólico total: 400-2000 mg ACE/kg. Las variedades pigmentadas contienen antocianinas (pelargonidina y delphinidina glucósidos) en concentraciones de 150-600 mg/kg. Adicionalmente, mashua contiene compuestos fenólicos únicos de la familia Tropaeolaceae (Chirinos, 2008).

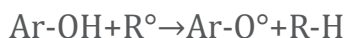
### **Olluco (*Ullucus tuberosus*)**

Contenido fenólico relativamente bajo (150-600 mg ACE/kg). Las variedades pigmentadas contienen principalmente betalaínas (no fenólicos) en lugar de antocianinas, aunque también presentan ácidos fenólicos en bajas concentraciones (Tapia, 2002).

### 6.2.3. Actividad Antioxidante

La actividad antioxidante de compuestos fenólicos se debe a múltiples mecanismos:

**Captura de radicales libres:** Los grupos hidroxilo fenólicos donan átomos de hidrógeno a radicales libres (ROS, RNS), convirtiéndolos en especies estables:



El radical fenoxilo resultante ( $\text{Ar-O}^\bullet$ ) es relativamente estable debido a deslocalización electrónica en el anillo aromático.

**Quelación de metales de transición:** Fenoles con grupos hidroxilo en posiciones orto quelan iones metálicos ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ) que catalizan reacciones de oxidación vía Fenton.

**Inhibición de enzimas prooxidantes:** Algunos fenoles inhiben lipoxigenasas, ciclooxigenasas, y xantina oxidasa, enzimas que generan especies reactivas de oxígeno.

**Regeneración de antioxidantes endógenos:** Fenoles pueden regenerar vitamina E y glutatión oxidados.

La capacidad antioxidante se cuantifica mediante diversos ensayos in vitro:

**Ensayo DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo):** Mide la capacidad de reducir el radical DPPH $^\bullet$  estable (coloración púrpura) a DPPH-H (amarillo):



donde AH representa el antioxidante. La disminución de absorbancia a 517 nm se relaciona con capacidad antioxidante. Resultados se expresan como concentración efectiva 50 (EC50): concentración de extracto requerida para reducir 50\% del DPPH inicial.

Ensayo ABTS [2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)]:

Similar a DPPH, utiliza el catión radical  $\text{ABTS}^\circ+$  (verde-azul) que es decolorado por antioxidantes. Permite análisis en medios acuosos y lipofílicos.

Ensayo FRAP (poder antioxidante reductor férrico):

Mide la reducción de  $\text{Fe}^{3+}$ , TPTZ (complejo incoloro) a  $\text{Fe}^{2+}$ -TPTZ (azul intenso) a pH ácido:



El incremento de absorbancia a 593 nm es proporcional al poder reductor. Resultados se expresan como equivalentes de  $\text{Fe}^{2+}$  o Trolox.

**Ensayo ORAC (capacidad de absorción de radicales de oxígeno):**

Mide la capacidad de inhibir la oxidación de fluoresceína inducida por radicales peroxilo generados térmicamente de AAPH. El área bajo la curva de decaimiento de fluorescencia se relaciona con capacidad antioxidante.



Extractos de variedades pigmentadas de papa muestran valores de ORAC de 20-80  $\mu\text{mol}$  Trolox equivalente/g peso fresco, significativamente superiores a variedades de pulpa blanca (5-15  $\mu\text{mol}$  TE/g). Estas capacidades son comparables a frutos del bosque (berries) reconocidos por alta actividad antioxidante (Brown, 2005).

#### **6.2.4. Efectos sobre la Salud Humana**

Estudios epidemiológicos y experimentales han asociado el consumo de dietas ricas en compuestos fenólicos con reducción del riesgo de enfermedades crónicas (Scalbert, 2005).

##### **Efectos cardiovasculares**

El ácido clorogénico y las antocianinas han demostrado efectos beneficiosos sobre marcadores de riesgo cardiovascular:

- Reducción de oxidación de LDL-colesterol, previniendo formación de placas ateroscleróticas.
- Mejora de función endotelial mediante incremento de óxido nítrico (vasodilatador).
- Reducción de presión arterial en individuos con hipertensión leve (reducción de 5-10 mmHg sistólica).
- Inhibición de agregación plaquetaria, reduciendo riesgo trombótico.

Estudios en humanos con consumo de 200 g/día de papas moradas durante 4 semanas mostraron reducción significativa de marcadores de estrés oxidativo y mejora del perfil lipídico (Vinson, 2012)

### **Efectos antidiabéticos:**

El ácido clorogénico inhibe  $\alpha$ -glucosidasa intestinal, enzima que hidroliza carbohidratos complejos a glucosa, retardando absorción de glucosa postprandial. Adicionalmente, estimula captación de glucosa en músculo esquelético independiente de insulina.

### **Efectos antiinflamatorios:**

Las antocianinas y ácidos fenólicos modulan vías de señalización inflamatoria:

- Inhibición de ciclooxigenasa-2 (COX-2) y lipoxigenasa, reduciendo síntesis de prostaglandinas y leucotrienos proinflamatorios.
- Supresión de factor nuclear kappa B (NF- $\kappa$ B), factor de transcripción que regula genes proinflamatorios.
- Reducción de citoquinas proinflamatorias (TNF- $\alpha$ , IL-6, IL-1 $\beta$ ).

### **Efectos neuroprotectores:**

Las antocianinas cruzan la barrera hematoencefálica y se acumulan en regiones cerebrales asociadas con aprendizaje y memoria (hipocampo, corteza cerebral). Mecanismos propuestos incluyen:

- Protección contra estrés oxidativo neuronal.
- Modulación de vías de señalización que regulan plasticidad sináptica.
- Estimulación de neurogénesis en hipocampo.
- Inhibición de acetilcolinesterasa, preservando neurotransmisión colinérgica.

Estudios en modelos animales sugieren que antocianinas de papa morada mejoran función cognitiva y reducen daño neuronal en modelos de enfermedad de Alzheimer (Joseph, 2003).

## 6.3. Carotenoides

### 6.3.1. Estructura y Tipos

Los carotenoides son pigmentos liposolubles responsables de coloraciones amarillas, naranjas, y rojas en vegetales. Estructuralmente, son tetraterpenoides (C<sub>40</sub>) con sistema de dobles enlaces conjugados que confiere propiedades de absorción de luz y capacidad antioxidante (Britton, 1995).

Los carotenoides se clasifican en:

**Carotenos:** hidrocarburos puros (C, H únicamente). Ejemplos: -caroteno, -caroteno, licopeno.

**Xantofilas:** carotenoides oxigenados conteniendo grupos hidroxilo, epoxi, o carbonilo. Ejemplos: luteína, zeaxantina, violaxantina, neoxantina.

En papas, los carotenoides principales incluyen:

- Luteína (40-60% del total de carotenoides)
- Violaxantina (20-40%)
- Neoxantina (5-15%)
- $\beta$ -caroteno (trazas en variedades blancas/ amarillas, hasta 10% en variedades anaranjadas)
- Zeaxantina (trazas)

### 6.3.2. Contenido en Variedades Andinas

El contenido de carotenoides en papa varía dramáticamente según el color de pulpa, Brown2005:

- Pulpa blanca: 50-150  $\mu\text{g}/100\text{ g}$  peso fresco
- Pulpa amarilla clara: 150-500  $\mu\text{g}/100\text{ g}$
- Pulpa amarilla intensa: 500-1500  $\mu\text{g}/100\text{ g}$
- Pulpa anaranjada: 1500-3000  $\mu\text{g}/100\text{ g}$

Variedades nativas andinas con pulpa amarilla intensa como ‘Huayro’, ‘Puka Ambrosía’, y ‘Qoyllu’ contienen concentraciones de carotenoides comparables a zanahoria, estableciéndolas como fuentes significativas de provitamina A.

El contenido de  $\beta$ -caroteno (provitamina A) varía de trazas en variedades blancas hasta 200-400  $\mu\text{g}/100\text{ g}$

en variedades anaranjadas. Considerando que 12 µg de β-caroteno equivalen a 1 µg de retinol (vitamina A), variedades anaranjadas pueden contribuir significativamente a cubrir requerimientos de vitamina A (700-900 µg retinol equivalente/día para adultos).

### 6.3.3. Actividad Biológica y Beneficios para la Salud

Actividad Provitamina A:

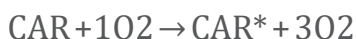
El β-caroteno, α-caroteno, y β-criptoxantina son precursores de vitamina A. La enzima β-caroteno 15,15'-monooxigenasa (BCMO1) en mucosa intestinal escinde β-caroteno generando dos moléculas de retinal, que se reduce a retinol (vitamina A).

La deficiencia de vitamina A es una de las carencias nutricionales más prevalentes globalmente, afectando principalmente a poblaciones en países en desarrollo. La biofortificación de papa con β-caroteno mediante mejoramiento convencional o transgénico representa una estrategia promisorio para combatir esta deficiencia (Diretto, 2007).

**Actividad antioxidante:**

Los carotenoides neutralizan especies reactivas de oxígeno mediante dos mecanismos:

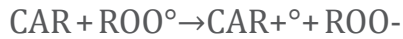
- **Captura física de oxígeno singlete (1C2)**



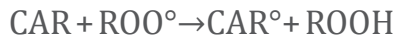
donde CAR\* es el carotenoide en estado excitado, que disipa energía mediante interac-

ciones con el solvente retornando al estado fundamental.

- **Captura de radicales peroxilo:**



ó



### **Protección ocular:**

La luteína y zeaxantina se acumulan selectivamente en la mácula lútea de la retina, donde absorben luz azul de alta energía y neutralizan especies reactivas de oxígeno generadas por fotooxidación. El consumo elevado de estos carotenoides se asocia con reducción del riesgo de degeneración macular relacionada con la edad (AMD) y cataratas (Seddon, 1994).

### **Efectos anticarcinogénicos:**

Estudios epidemiológicos sugieren asociación inversa entre consumo de carotenoides y riesgo de cánceres de pulmón, próstata, mama, y estómago. Mecanismos propuestos incluyen:

- Modulación de comunicación celular mediante gap junctions.
- Regulación de expresión génica vía receptores nucleares (RAR, RXR).
- Inducción de enzimas de detoxificación de fase II.

- Inhibición de proliferación celular y promoción de apoptosis.

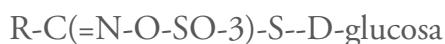
Sin embargo, ensayos clínicos con suplementación de  $\beta$ -caroteno en fumadores mostraron resultados inesperados (incremento de cáncer de pulmón), sugiriendo que efectos beneficiosos provienen de matrices alimentarias completas más que de compuestos aislados (Omenn, 1996).

## 6.4 Glucosinolatos

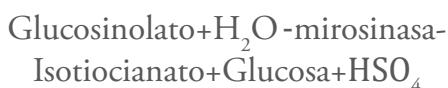
### 6.4.1. Estructura Química y Distribución

Los glucosinolatos son glucósidos azufrados característicos de la familia Brassicaceae y familias relacionadas (Tropaeolaceae). Su estructura general incluye un grupo  $\beta$ -D-tioglucosa, un grupo sulfonato, y una cadena lateral variable (R) derivada de aminoácidos (Fahey, 2001).

Estructura general:



Los glucosinolatos son hidrolizados por la enzima mirosinasa (tioglucosidasa) cuando los tejidos vegetales son dañados (masticación, procesamiento), generando isotiocianatos, nitrilos, tiocianatos, u otros productos según pH, iones metálicos, y proteínas espectrinas presentes:



### 6.4.2. Glucosinolatos en Mashua

La mashua (*Tropaeolum tuberosum*) es la única entre los tubérculos andinos principales que contiene glucosinolatos significativos, debido a su pertenencia a Tropaeolaceae, familia relacionada con Brassicaceae (Johns, 1982).

Los glucosinolatos principales identificados en mashua incluyen:

- Glucotropaeolina (bencilglucosinato): el más abundante, 80-150 mg/100 g peso seco.
- 4-metoxiglucotropaeolina: 10-30 mg/100 g peso seco.
- Otros glucosinolatos aromáticos en trazas.

El contenido total de glucosinolatos en mashua (100-200 mg/100 g peso seco) es comparable al de brócoli o col rizada, estableciendo a la mashua como fuente significativa de estos compuestos bioactivos.

La hidrólisis de glucotropaeolina por mirosinasa genera bencilisotiocianato (BITC), responsable del sabor picante característico de la mashua:





### 6.4.3. Actividades Biológicas

#### **Actividad antimicrobiana:**

Los isotiocianatos derivados de glucosinolatos exhiben amplio espectro antimicrobiano contra bacterias Gram-positivas y Gram-negativas, hongos, y levaduras. El BITC de mashua muestra actividad contra *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Candida albicans*, y patógenos de plantas (Johns, 1982).

- El mecanismo antimicrobiano involucra:
- Reacción con grupos sulfhidrilo (-SH) de proteínas y glutatión, inactivando enzimas esenciales.
- Alteración de permeabilidad de membranas celulares.
- Inhibición de síntesis de ADN y ARN.

#### **Actividad anticáncer:**

Los isotiocianatos son inductores potentes de enzimas de fase II de detoxificación (glutatión S-transferasas, UDP-glucuronosil transferasas, NAD(P)H quinona oxidoreductasa), que catalizan conjugación y excreción de carcinógenos (Talalay, 1992).

El mecanismo principal involucra activación del factor de transcripción Nrf2 (nuclear factor erythroid 2-related factor 2), que regula expresión de genes antioxidantes y de detoxificación mediante unión a elementos de respuesta antioxidante (ARE) en promotores génicos.

Estudios epidemiológicos han asociado alto consumo de vegetales crucíferos (ricos en glucosinolatos) con reducción del riesgo de cánceres de pulmón, colorrectal, próstata, y mama. Ensayos preclínicos con isotiocianatos han demostrado inhibición de carcinogénesis química en modelos animales (Fahey, 2001).

Los isotiocianatos inhiben producción de mediadores proinflamatorios (prostaglandina  $E_2$ , óxido nítrico) mediante supresión de COX-2 y óxido nítrico sintasa inducible (iNOS). Adicionalmente, suprimen activación de NF- $\kappa$ B, factor de transcripción proinflamatorio clave (Heiss, 2001).

El sabor picante intenso de la mashua debido a glucosinolatos limita su aceptabilidad como alimento directo. Estrategias para reducir glucosinolatos incluyen:

- Cocción en agua: los glucosinolatos son solubles en agua; cocción durante 15-30 minutos reduce contenido en 50-80%.
- Fermentación: bacterias lácticas degradan glucosinolatos.
- Mejoramiento genético: selección de genotipos con bajo contenido de glucosinolatos manteniendo otros atributos agronómicos.

Sin embargo, para aplicaciones nutracéuticas o como ingredientes funcionales, el alto contenido de glucosinolatos representa una ventaja, posicionando a la mashua como fuente natural de isotiocianatos bioactivos (Johns, 1982).

## 6.5. Fructooligosacáridos

### 6.5.1. Estructura y Propiedades

Los fructooligosacáridos (FOS) son oligosacáridos de bajo peso molecular compuestos por cadenas cortas de fructosa (típicamente 3-10 unidades) con una glucosa terminal, unidos mediante enlaces  $\beta(2'1)$ , Roberfroid2007.

Estructura general de FOS:

Glu-[Fru] $_n$  donde  $n = 2-9$

Los FOS son considerados fibra soluble y prebióticos debido a que:

Resisten hidrólisis por enzimas digestivas humanas (ausencia de  $\beta$ -fructofuranosidasas en intestino delgado).

Son fermentados selectivamente por bacterias beneficiosas del colon (bifidobacterias, lactobacilos).

Estimulan crecimiento y actividad de microbiota intestinal benéfica.

### 6.5.2. Yacón como Fuente de FOS

El yacón (*Smallanthus sonchifolius*) es la fuente más rica de FOS entre tubérculos y raíces, con contenido de 40-70\% del peso seco de raíces frescas, Seminario2003.

Los FOS de yacón tienen grado de polimerización

(GP) predominantemente entre 3 y 10, con la siguiente distribución típica:

- 1-kestosa (GP 3): 15-25%
- Nistosa (GP 4): 20-30%
- 1<sup>F</sup>-β-fructofuranosil nistosa (GP 5): 15-25%
- FOS con GP 6-10: 30-40%

El contenido de FOS en yacón varía según:

- Genotipo: algunas accesiones contienen hasta 75% de FOS.
- Madurez: FOS se acumulan durante crecimiento de raíces, alcanzando máximo en madurez fisiológica.
- Almacenamiento postcosecha: exposición al sol durante 7-10 días incrementa dulzor por hidrólisis parcial de FOS a azúcares simples (fructosa, glucosa, sacarosa).

### 6.5.3. Efectos Prebióticos y Beneficios para la Salud

#### **Efecto prebiótico:**

Los FOS de yacón son fermentados en el colon por bifidobacterias y lactobacilos, generando:

- Ácidos grasos de cadena corta (acetato, propionato, butirato) que nutren

colonocitos, reducen pH colónico (inhibiendo patógenos), y son absorbidos proporcionando energía al hospedero.

- Vitaminas del complejo B y vitamina K sintetizadas por bacterias.
- Modulación de respuesta inmune intestinal.

Estudios en humanos con consumo de 20-40 g/día de FOS de yacón durante 2-4 semanas han demostrado:

- Incremento de 1-2 órdenes de magnitud en poblaciones de bifidobacterias fecales.
- Reducción de poblaciones de bacterias potencialmente patógenas (*Clostridium* spp., *E. coli*).
- Mejora del tránsito intestinal y consistencia fecal.

Ensayos clínicos han reportado que consumo regular de yacón o FOS de yacón:

- Reduce glucemia postprandial en 15-25 % en individuos con diabetes tipo 2.
- Mejora sensibilidad a insulina (reducción de índice HOMA-IR).
- Reduce colesterol LDL en 10-15 %.
- Reduce triglicéridos séricos en 10-20 %.

- Promueve modesta pérdida de peso (1-2 kg en 12 semanas) por incremento de saciedad y reducción de ingesta calórica.

Los mecanismos propuestos incluyen:

- Retardo de vaciamiento gástrico, reduciendo velocidad de absorción de glucosa.
- Incremento de secreción de hormonas gastrointestinales reguladoras de apetito (GLP-1, PYY).
- Mejora de metabolismo hepático de lípidos mediante ácidos grasos de cadena corta (propionato inhibe lipogénesis hepática).
- Reducción de inflamación de bajo grado asociada a obesidad y resistencia a insulina.

### **Efectos sobre la salud ósea:**

Los FOS incrementan absorción intestinal de calcio y magnesio mediante:

- Reducción de pH colónico que incrementa solubilidad de minerales.
- Incremento de área de superficie de absorción por efecto trófico sobre mucosa intestinal.
- Producción de péptidos por bacterias que estimulan absorción de calcio.

Estudios en animales han demostrado que suplemen-

tación con FOS incrementa densidad mineral ósea y reduce riesgo de osteoporosis, Scholz-Ahrens2007.

## 6.6. Compuestos Bioactivos Adicionales

### 6.6.1. Alcaloides y Glicoalcaloides

Los glicoalcaloides son alcaloides glicosilados característicos del género *Solanum*. En papa, los glicoalcaloides principales son  $\alpha$ -solanina y  $\alpha$ -chaconina, derivados de la aglicona solanidina glicosilada con cadenas de azúcares (Friedman, 2006).

El contenido de glicoalcaloides en tubérculos de papa comercial es típicamente 20-150 mg/kg peso fresco, concentrándose en peridermis y regiones verdeadas por exposición a luz (incremento de hasta 10 veces). Niveles superiores a 200 mg/kg son considerados potencialmente tóxicos (Friedman, 2006).

Los glicoalcaloides tienen efectos biológicos complejos:

**Toxicidad:** Actúan como inhibidores de acetilcolinesterasa y causan disrupción de membranas celulares. Dosis tóxicas (>200 mg) causan síntomas gastrointestinales (náusea, vómito, diarrea) y neurológicos (confusión, debilidad).

**Actividad anticáncer:** Paradójicamente, concentraciones subtóxicas de  $\alpha$ -chaconina han demostrado actividad citotóxica selectiva contra células cancerosas in vitro, mediante inducción de apoptosis y inhibición de proliferación. Sin embargo, el margen de seguridad estrecho limita aplicaciones terapéuticas (Friedman, 2006).

Las variedades amargas de papa (*S. juzepczukii*, *S. curtilobum*) contienen glicoalcaloides en concentraciones de 500-2000 mg/kg, requiriendo procesamiento (chuño, tunta) para reducirlos a niveles seguros antes del consumo.

### 6.6.2. Macamidas y Macaenos

La maca (*Lepidium meyenii*) contiene compuestos lipídicos únicos denominados macamidas y macaenos, derivados de amidas de ácidos grasos con bencilamina o bencilnitrilos (Gonzales, 2012).

Las macamidas principales incluyen:

- N-benzil-9Z,12Z-octadecadienamida
- N-benzil-9Z,12Z,15Z-octadecatrienamida
- N-benzil-palmitamida
- N-benzil-oleamida

Estas moléculas están presentes en concentraciones de 0.1-0.6\% del peso seco y se consideran responsables de efectos adaptogénicos y neuroprotectores atribuidos a maca, Gonzales2012.

Actividades biológicas reportadas:

- Inhibición de ácido graso amida hidrolasa (FAAH), enzima que degrada anandamida (endocannabinoide), potencialmente explicando efectos sobre ánimo y ansiedad.



- Actividad neuroprotectora contra estrés oxidativo en cultivos neuronales.
- Modulación de función sexual y fertilidad (mecanismos no completamente elucidados).

## **6.7. Extracción y Cuantificación de Compuestos Bioactivos**

### **6.7.1. Métodos de Extracción**

- Homogenización de muestra (50-100 g) en solvente extractante (típicamente metanol 80%, etanol 70%, o acetona 70%) con relación muestra:solvente de 1:5 a 1:10 (p/v).
- Maceración con agitación durante 2-24 horas a temperatura ambiente o 4°C (oscuridad para prevenir fotodegradación).
- Filtración o centrifugación (5000 rpm, 10 min) para separar extracto de residuo sólido.
- Re-extracción del residuo con solvente fresco (2-3 veces).
- Combinación de extractos y evaporación de solvente bajo presión reducida (<40°C).
- Reconstitución del extracto seco en volumen conocido de solvente para análisis.

Ondas ultrasónicas (20-100 kHz) generan cavitación que rompe células vegetales facilitando liberación de compuestos. Ventajas: reducción de tiempo (15-60

min vs. 2-24 h), menor consumo de solvente, mayor rendimiento.

Calentamiento dieléctrico selectivo incrementa temperatura y presión intracelular, promoviendo ruptura de pared y liberación de compuestos. Tiempo típico: 5-20 min a 50-100°C.

Utiliza CO<sub>2</sub> supercrítico (presión >73 bar, temperatura >31°C) como solvente. Ventajas: selectividad, ausencia de residuos de solvente, adecuado para compuestos termolábiles. Limitación: inversión inicial elevada.

Los carotenoides requieren solventes orgánicos no polares o moderadamente polares:

- Homogenización de muestra en hexano:acetona:etanol (50:25:25 v/v/v) con antioxidante (BHT 0.1%) para prevenir oxidación.
- Extracción en oscuridad con agitación durante 30-60 min.
- Adición de agua para separación de fases.
- Transferencia de fase hexánica (superior) conteniendo carotenoides.
- Re-extracción de fase acuosa residual con hexano (2-3 veces).

Combinación de extractos hexánicos, lavado con agua, secado con Na<sub>2</sub>O<sub>4</sub> anhidro.

- Evaporación bajo nitrógeno y reconstitución en solvente apropiado (hexano, acetona).

## 6.7.2. Métodos de Cuantificación

### **Espectrofotometria UV-Vis:**

Método rápido y económico para cuantificación de fenoles totales mediante el ensayo de Folin-Ciocalteu:

- Mezcla de alícuota de extracto (0.5 mL) con reactivo Folin-Ciocalteu (2.5 mL, diluido 1:10).
- Incubación durante 5 min.
- Adición de carbonato de sodio 7.5% (2 mL).
- Incubación durante 60-90 min a temperatura ambiente.
- Medición de absorbancia a 765 nm.
- Cuantificación mediante curva de calibración con ácido gálico (expresión: mg equivalentes de ácido gálico/100 g).

Para antocianinas, método del pH diferencial:

- Dilución de extracto en buffer pH 1.0 (KCl 0.025 M) y pH 4.5 (acetato de sodio 0.4 M).
- Medición de absorbancia a  $a_{vis-max}$  (típicamente 510-530 nm) y 700 nm (corrección de turbidez).

- Cálculo del contenido de antocianinas monoméricas:

$$\text{Antocianinas (mg/L)} = \frac{A \times MW \times DF \times 10^3}{\epsilon \times l}$$

donde A = (A510 - A700)<sub>pH1.0</sub> - (A510 - A700)<sub>pH4.5</sub>, MW es el peso molecular del pigmento (típicamente cianidina-3-glucósido, 449.2 g/mol), DF es el factor de dilución,  $\epsilon$  es el coeficiente de extinción molar (26,900 L/mol•cm para cianidina-3-glucósido), y l es la longitud del paso óptico (cm).

### **Cromatografía Líquida de alta Resolución (HPLC):**

Permite separación, identificación y cuantificación de compuestos individuales.

Condiciones típicas para fenoles y antocianinas:

- Columna: C18 de fase reversa (250 x 4.6 mm, 5  $\mu$ m)
- Fase móvil: gradiente de agua acidificada (ácido fórmico 0.1%) y acetonitrilo
- Flujo: 1 mL/min
- Temperatura: 25-30°C
- Detección: UV-Vis con detector de arreglo de diodos (DAD) a 280, 320, 360, 520 nm
- Volumen de inyección: 10-20  $\mu$ L

La identificación se realiza comparando tiempos de retención y espectros UV-Vis con estándares auténticos. La cuantificación usa curvas de calibración con estándares externos.

### **Espectrometría de masa (LC-MS):**

Para identificación inequívoca, HPLC se acopla a espectrometría de masas (MS o MS/MS):

- Ionización: electrospray (ESI) en modo positivo o negativo
- Analizador: cuadrupolo, tiempo de vuelo (TOF), o trampa iónica
- Detección: relación masa/carga ( $m/z$ ) de iones moleculares y fragmentos

Esta técnica permite identificación de compuestos sin necesidad de estándares, mediante comparación de  $m/z$  y patrones de fragmentación con bases de datos espectrales.

## **6.8. Estabilidad y Retención durante Procesamiento**

Los compuestos bioactivos pueden degradarse durante procesamiento térmico, almacenamiento, y preparación culinaria. Comprender factores que afectan la estabilidad es crucial para preservar valor nutracéutico (Rickman, 2007).

## **Efectos de procesamiento térmico:**

### **Cocción de agua (hervido):**

- Pérdidas de compuestos hidrosolubles por lixiviación (fenoles solubles 30-50%, vitamina C 40-60%).
- Degradación térmica moderada (temperatura limitada a 100°C).
- Retención mejorada en cocción con mínimo agua (cocción al vapor).

### **Horneado / asado:**

- Temperaturas superiores (150-200°C) causan mayor degradación térmica.
- Sin pérdidas por lixiviación.
- Posible concentración por evaporación de agua.
- Retención neta de antocianinas: 60-80%.

### **Fritura:**

- Temperatura muy elevada (160-180°C) causa degradación significativa.
- Tiempo corto mitiga pérdidas.
- Retención de antocianinas: 40-70%.

**Microondas:**

- Calentamiento rápido y uniforme.
- Tiempo corto minimiza degradación.
- Retención generalmente superior a métodos convencionales.

**Estrategias para maximizar retención:**

- Minimizar tiempo de cocción.
- Cocinar con piel (concentración de fitoquímicos en peridermis).
- Acidificar agua de cocción (pH 3-4) para estabilizar antocianinas.
- Evitar pelado cuando sea aceptable.
- Consumir líquidos de cocción (sopas, caldos).
- Almacenar tubérculos en oscuridad y refrigeración para prevenir degradación enzimática.





## Capítulo VII

# Sostenibilidad y Gestión Ambiental en la Agroindustria Andina

### 7.1. Introducción a la Sostenibilidad en Sistemas Agroindustriales

La sostenibilidad agroindustrial se define como la capacidad de los sistemas de producción, transformación y distribución de alimentos para satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades, manteniendo simultáneamente la integridad ecológica, la equidad social, y la viabilidad económica (Pretty, 2008). Este concepto integrador, basado en los tres pilares de la sostenibilidad (ambiental, social, económico), ha adquirido relevancia crítica en el contexto de cambio climático, degradación de recursos naturales, pérdida de biodiversidad, y crecientes demandas alimentarias de una población mundial que se proyecta alcanzará 9.7 mil millones para 2050 (FAO, 2018).

En la región andina, la sostenibilidad de sistemas agroindustriales enfrenta desafíos particulares relacionados con la fragilidad ecológica de ecosistemas de montaña, la vulnerabilidad de comunidades rurales a perturbaciones económicas y climáticas, y la necesidad de conservar agrobiodiversidad y conocimientos tradicionales mientras se mejora la productividad y competitividad (Zimmerer, 2010). Los tubérculos y

raíces andinas, como componentes centrales de sistemas alimentarios tradicionales, presentan tanto oportunidades como desafíos para el desarrollo sostenible.

La evaluación y mejora de la sostenibilidad requiere marcos metodológicos que integren indicadores ambientales (huella de carbono, huella hídrica, uso de tierra, pérdida de biodiversidad), sociales (empleo, equidad, seguridad alimentaria, preservación cultural), y económicos (rentabilidad, distribución de valor, resiliencia). Herramientas como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), la evaluación de servicios ecosistémicos, y sistemas de certificación de sostenibilidad proporcionan marcos para cuantificar impactos y orientar mejoras (Roy, 2009).

Este capítulo examina los principales aspectos de sostenibilidad en la producción y transformación agroindustrial de tubérculos y raíces andinas, incluyendo gestión de recursos hídricos, mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, manejo de residuos mediante economía circular, conservación de agrobiodiversidad, y sistemas de certificación que reconocen prácticas sostenibles y agregan valor a productos diferenciados.

## **7.2. Huella Hídrica en Sistemas de Producción de Tubérculos**

### **7.2.1. Conceptos y Metodología**

La huella hídrica (HH) cuantifica el volumen total de agua dulce utilizada directa e indirectamente para producir un bien o servicio, considerando agua consumida y contaminada a lo largo de toda la cadena de producción (Hoekstra, 2011). La HH se descompone en tres componentes:

- Huella hídrica verde (HH verde): volumen de agua de precipitación evapotranspirada por cultivos.

- Huella hídrica azul (HH azul): volumen de agua superficial o subterránea consumida (evapotranspirada o incorporada al producto).
- Huella hídrica gris (HH gris): volumen de agua necesario para diluir contaminantes hasta concentraciones aceptables según estándares de calidad.

La huella hídrica total se expresa como:

$$HH_{\text{total}} = HH_{\text{verde}} + HH_{\text{azul}} + HH_{\text{gris}}$$

Para cultivos agrícolas, la HH verde se calcula mediante:

$$HH_{\text{verde}} = \frac{\sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{\text{verde}}}{Y}$$

donde ET verde es la evapotranspiración de agua de precipitación (mm/día),  $l_{gp}$  es la duración del período de crecimiento (días), y Y es el rendimiento del cultivo (kg/ha). El resultado se expresa en m<sup>3</sup>/ton.

La HH azul se calcula similarmente:

$$HH_{\text{verde}} = \frac{\sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{\text{azul}}}{Y}$$

donde ET azules la evapotranspiración de agua de riego.

La HH gris relacionada con aplicación de fertilizantes se estima como:

$$H_{gris} = \frac{\alpha \times AR}{C_{max} - C_{nat}} \times \frac{1}{y}$$

donde  $\alpha$  es la fracción de lixiviación del fertilizante, AR es la tasa de aplicación del químico (kg/ha),  $C_{max}$  es la concentración máxima aceptable (kg/m<sup>3</sup>), y  $C_{nat}$  es la concentración natural en agua receptora (kg/m<sup>3</sup>).

### 7.2.2. Huella Hídrica de Papa y Tubérculos Andinos

Estudios de huella hídrica de papa muestran variabilidad considerable según región, sistema de producción, y rendimiento, Mekonnen 2011.

- HHverde: 150-250 m<sup>3</sup>/ton
- HHazul: 50-150 m<sup>3</sup>/ton
- HHgris: 30-80 m<sup>3</sup>/ton
- HHtotal: 230-480 m<sup>3</sup>/ton

#### **Papa de secano (altiplano):**

- HHverde: 300-500 m<sup>3</sup>/ton
- HHazul: 0-20 m<sup>3</sup>/ton
- HHgris: 10-40 m<sup>3</sup>/ton
- HHtotal: 310-560 m<sup>3</sup>/ton

La HHverde es mayor en sistemas de secano del altiplano debido a menores rendimientos (8-15 ton/ha vs. 25-45 ton/ha en sistemas irrigados intensivos). Sin embargo, la HHazul es mínima, lo que representa ventaja en regiones con escasez de agua superficial o subterránea.

Comparativamente, la HH de papa es intermedia entre cultivos. Cereales como arroz presentan HH de 1500-3000 m<sup>3</sup>/ton, mientras que vegetales de hoja tienen HH de 100-300 m<sup>3</sup>/ton. La eficiencia hídrica relativamente alta de papa (rendimiento de materia seca por unidad de agua consumida) la posiciona favorablemente para seguridad alimentaria en contextos de escasez hídrica (Mekonnen, 2011).

### **7.2.3. Estrategias para Reducción de Huella Hídrica**

El riego por gravedad tradicional (surcos, inundación) presenta eficiencia de aplicación de 40-60%, con pérdidas significativas por percolación profunda y escorrentía superficial. Tecnologías mejoradas incrementan eficiencia:

- Riego por aspersión: eficiencia 70-85%. Permite aplicación uniforme y control preciso de lámina. Requiere inversión en equipos (aspersores, tuberías, bomba).
- Riego por goteo: eficiencia 85-95%. Aplica agua directamente en zona radicular, minimizando evaporación y percolación. Óptimo para cultivos en hilera como papa. Limitación: inversión inicial elevada (USD 1500-3000/ha).

- Riego deficitario controlado (RDC): estrategia que aplica menos agua que la demanda evapotranspirativa durante fases fenológicas menos sensibles, reduciendo consumo total de agua con mínimo impacto en rendimiento. En papa, restricción hídrica moderada (80% ET<sub>c</sub>) durante crecimiento vegetativo puede reducir consumo de agua en 15-25% con reducción de rendimiento <10%.

El riego empírico (calendario fijo, observación visual) frecuentemente resulta en sobre-riego o déficit. Métodos basados en demanda mejoran eficiencia:

- Balance hídrico: estima necesidades de riego mediante ecuación:

$$I = ET_c - P_{ef} - \Delta S$$

donde I es la lámina de riego necesaria, ET<sub>c</sub> es la evapotranspiración del cultivo (mm), P<sub>ef</sub> es la precipitación efectiva (mm), y ΔS es el cambio en almacenamiento de agua en suelo (mm).

- Sensores de humedad de suelo: Tensiómetros, sondas de capacitancia, o sensores TDR miden contenido de humedad en tiempo real, permitiendo riego cuando se alcanza umbral crítico (típicamente 50-60% de agua disponible agotada para papa).

Imágenes satelitales y drones: Índices de vegetación (NDVI, NDWI) estiman estrés hídrico y permiten aplicación variable de riego según necesidades espaciales heterogéneas.

Existe variabilidad genética significativa en eficiencia de uso de agua (EUA, definida como rendimiento/ evapotranspiración) entre genotipos de papa. Variedades nativas andinas adaptadas a condiciones de secano frecuentemente presentan EUA superior a cultivares modernos. El mejoramiento genético orientado a incrementar EUA mediante selección de genotipos con:

- Sistemas radicales profundos que exploran mayor volumen de suelo.
- Mayor conductancia estomática bajo estrés moderado.
- Mejor partición de fotosintatos hacia tubérculos.
- Tolerancia a déficit hídrico durante fases críticas.

puede incrementar EUA en 15-30% sin comprometer resistencia a enfermedades o calidad (Schaffleitner, 2011).

### **Reducción de huella hídrica gris:**

- Optimización de fertilización mediante análisis de suelo y aplicaciones fraccionadas que minimizan lixiviación de nitratos.
- Uso de inhibidores de nitrificación que retardan conversión de amonio a nitrato, reduciendo pérdidas por lixiviación.

- Implementación de franjas buffer vegetadas que capturan nutrientes en escorrentía antes de alcanzar cuerpos de agua.
- Adopción de agricultura orgánica que elimina uso de agroquímicos sintéticos, aunque puede resultar en menor rendimiento y mayor HHverde.

## 7.3. Huella de Carbono y Mitigación de Emisiones

### 7.3.1. Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono

La huella de carbono (HC) cuantifica las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) expresadas en equivalentes de  $\text{CO}_2$  ( $\text{CO}_2\text{eq}$ ) asociadas con la producción de un bien, considerando todas las etapas del ciclo de vida desde la extracción de materias primas hasta la disposición final (ISO, 2018).

Los principales GEI en sistemas agrícolas incluyen:

- Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ): combustión de combustibles fósiles, cambio de uso de suelo.
- Metano ( $\text{CH}_4$ ): descomposición anaerobia de materia orgánica. Potencial de calentamiento global (PCG) = 28 (horizonte 100 años).
- Óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ): aplicación de fertilizantes nitrogenados, deposición de estiércol. PCG = 265.



Las emisiones totales se expresan como:

$$HC = \sum_i (GEI_i \times PCG_i)$$

donde  $GEI_i$  es la masa del gas  $i$  emitida (kg), y  $PCG_i$  es su potencial de calentamiento global.

### 7-3-2- Fuentes de Emisiones en Producción de Papa

Estudios de ACV de papa identifican las siguientes fuentes principales de emisiones (Haverkort, 2008):

#### 1. Fertilización nitrogenada (40-60% de emisiones totales):

La aplicación de fertilizantes nitrogenados resulta en emisiones directas de  $N_2O$  del suelo mediante nitrificación y desnitrificación. El factor de emisión típico es 1-1.5% del N aplicado se convierte a  $N_2O-N$  (IPCC, 2019).

Para una aplicación típica de 150 kg N/ha:

$$Emision\ N_2O\ (kg\ CO_2eq/ha) = 150 \times 0,01 \times \frac{44}{28} \times 256 = 627\ kg\ CO_2eq/ha$$

donde 44/28 es la conversión de N a  $N_2O$ , y 256 es el PCG del  $N_2O$ .

Adicionalmente, la producción de fertilizantes sintéticos (proceso Haber-Bosch) consume energía fósil significativa, generando emisiones indirectas de 3-7 kg ( $CO_2eq$ )/kg N producido.

## **2. Combustibles fósiles (20-30 %):**

Operaciones mecanizadas (preparación de suelo, siembra, aplicaciones, cosecha) consumen diésel. El factor de emisión es aproximadamente 3.2 kg (CO<sub>2</sub> eq)/L diésel.

Para cultivo mecanizado de papa con consumo típico de 200-300 L diésel/ha:

Emisiones combustibles (kg CO<sub>2</sub>eq) / ha)=250  
×3,2=(800kg CO<sub>2</sub> eq)/ha

## **3. Producción de otros insumos (10-20 %):**

Semilla, pesticidas, maquinaria (amortización de manufactura), transporte de insumos contribuyen emisiones adicionales.

## **4. Procesamiento postcosecha (5-15 %):**

Almacenamiento refrigerado (electricidad para refrigeración), lavado, clasificación, empaque.

## **Huella de carbono total de papa:**

Estudios reportan HC de papa en campo de 150-400 kg (CO<sub>2</sub> eq)/ton producto, dependiendo de intensidad de insumos, mecanización, y rendimiento. Sistemas orgánicos con bajo uso de insumos sintéticos presentan HC de 100-250 kg (CO<sub>2</sub> eq)/ton, aunque rendimientos menores pueden resultar en HC/unidad de área similar a sistemas convencionales (Haverkort, 2008).

Comparativamente, la HC de papa es inferior a productos animales (carne de res: 15,000-30,000 kg (CO<sub>2</sub> eq)/ton; lácteos: 1,000-2,000 kg (CO<sub>2</sub> eq)/ton) pero superior a cereales (trigo: 300-600 kg (CO<sub>2</sub> eq)/ton; arroz: 1,500-3,000 kg (CO<sub>2</sub> eq)/ton debido a emisiones de metano en cultivo inundado).

### 7.3.3 Estrategias de Mitigación

Optimización de fertilización nitrogenada:

- Manejo 4R: aplicación de fertilizante en dosis correcta (Right rate), momento correcto (Right timing), lugar correcto (Right place), y fuente correcta (Right source).
- Agricultura de precisión: aplicación variable de N basada en mapas de variabilidad espacial (muestreo de suelo, sensores de NDVI).
- Inhibidores de nitrificación/ureasa: productos como DMPP, NBPT retardan transformación de fertilizantes, reduciendo pérdidas gaseosas en 30-50%.
- Cultivos de cobertura leguminosos: fijan N<sub>2</sub> atmosférico, reduciendo requerimientos de fertilizantes sintéticos.

Optimización de fertilización puede reducir emisiones de N<sub>2</sub>O en 20-40\% manteniendo rendimientos mediante mejora de eficiencia de uso de nitrógeno (Cassman, 2002).

### **Reducción de consumo de combustibles fósiles:**

- Labranza reducida o cero: minimiza pasadas de maquinaria. Labranza cero puede reducir consumo de combustible en 50-70 % comparado con labranza convencional.
- Optimización de operaciones: combinación de operaciones (por ejemplo, aplicación de fertilizante durante siembra en una sola pasada).
- Maquinaria eficiente: tractores y equipos modernos con motores de mayor eficiencia energética.
- Energías renovables: sistemas de riego alimentados por energía solar o eólica en lugar de bombas diésel.

### **Secuestro de carbono en suelo:**

Prácticas que incrementan materia orgánica del suelo (MOS) secuestran CO<sub>2</sub> atmosférico:

- Incorporación de residuos de cosecha: en lugar de quema, que emite CO<sub>2</sub>.
- Aplicación de compost y estiércol: incrementa MOS. Tasa de secuestro típica: 0.3-0.8 ton C/ha/año.
- Rotaciones con cultivos de alta producción de biomasa: incluir pastos o leguminosas forrajeras.

- Agroforestería: integración de árboles en sistemas agrícolas. Secuestro adicional: 2-5 ton C/ha/año en biomasa arbórea.

Sin embargo, el secuestro de carbono tiene límites: suelos alcanzan nuevo equilibrio de MOS después de 20-50 años, tras lo cual el secuestro neto cesa. El carbono secuestrado también puede liberarse si las prácticas cambian (Lal, 2004).

### **Mejoramiento genético para eficiencia de nitrógeno:**

Variedades con mayor eficiencia de uso de nitrógeno ( $EUN = \text{rendimiento}/N \text{ aplicado}$ ) requieren menos fertilizante para alcanzar rendimientos objetivo. El mejoramiento para EUN involucra selección de genotipos con:

- Sistemas radiculares que capturan N más eficientemente.
- Mayor capacidad de asimilación de N en proteínas y translocación a tubérculos.
- Mantención de rendimiento bajo niveles moderados de N.

Incrementos de EUN del 15-25\% son factibles mediante mejoramiento, reduciendo proporcionalmente la HC asociada a fertilización (Hawkesford, 2012).

## **7-4- Economía Circular y Gestión de Residuos**

### **7-4-1- Principios de Economía Circular**

La economía circular es un modelo económico que contrasta con el modelo lineal tradicional (extraer-producir-consumir-desechar), enfatizando la reducción, reutilización, reciclaje, y recuperación de materiales y energía en ciclos cerrados (Ellen, 2013). En sistemas agroindustriales, la economía circular implica:

- Minimización de residuos en origen mediante optimización de procesos.
- Valorización de subproductos y residuos como insumos para otros procesos.
- Recuperación de nutrientes, energía, y compuestos de valor agregado.
- Diseño de productos y empaques para reciclabilidad o compostabilidad.

### **7.4.2. Residuos en Procesamiento de Papa**

El procesamiento industrial de papa genera volúmenes significativos de residuos sólidos y líquidos (Arapoglou, 2010):

Mejoramiento genético para eficiencia de nitrógeno:

- Tierra adherida, peridermis, tubérculos no conformes.
- Composición: 15-20% materia seca, 70-

80% almidón (base seca), 5-10% proteína,  
2-3 % fibra.

**Agua de proceso (agua de fruto):**

- Generación: 5-15 m<sup>3</sup>/ton papa procesada.
- Composición: proteínas solubles (patatina), azúcares, sales minerales, compuestos fenólicos.
- DQO (demanda química de oxígeno): 5,000-15,000 mg/L.
- DBO5 (demanda bioquímica de oxígeno): 3,000-10,000 mg/L.

**Pulpa de extracción de almidón (5-8 % del peso):  
Fibra celulósica, almidón residual, proteínas.**

- Humedad: 75-85%.

El vertido directo de estos residuos causa impactos ambientales severos:

- Contaminación de cuerpos de agua por alta carga orgánica (eutrofización, agotamiento de oxígeno disuelto).
- Generación de olores en descomposición anaerobia.
- Atracción de vectores (moscas, roedores).

### 7.4.3. Estrategias de Valorización

#### **Recuperación de almidón residual:**

Los residuos de pelado y pulpa contienen almidón recuperable mediante:

- Desintegración mecánica (molienda, licuado).
- Separación por tamizado o ciclones.
- Lavado y sedimentación.
- Deshidratación y secado.

La recuperación puede incrementar rendimiento de almidón total en 2-5%, mejorando rentabilidad y reduciendo carga orgánica de efluentes (Arapoglou, 2010).

#### **Extracción de proteínas:**

El agua de fruto contiene proteínas solubles de alto valor (principalmente patatina, con propiedades emulsificantes y espumantes). Procesos de recuperación incluyen:

- Precipitación isoelectrica: ajuste de pH a punto isoelectrico de patatina (pH 4.5-5.0) causa precipitación. Rendimiento: 60-80% de proteína soluble.
- Ultrafiltración: membranas con corte molecular 10-50 kDa retienen proteínas



permitiendo paso de azúcares y sales.  
Concentración de proteína: 10-20 veces.

- Precipitación con sales: adición de sulfato de amonio al 60-80% de saturación precipita proteínas.

Las proteínas recuperadas tienen aplicaciones en alimentos (emulsificantes, espumantes), nutrición animal (suplemento proteico de alta digestibilidad), y formulaciones farmacéuticas (Bárta, 2012)

### **Producción de alimento animal:**

La pulpa de papa, después de prensado para reducir humedad a 20-30%, puede ensilarse o secarse para alimento animal. Composición nutricional (base seca):

- Energía metabolizable: 12-14 MJ/kg
- Proteína cruda: 8-12%
- Fibra: 5-8%
- Almidón: 40-50%

La pulpa seca se usa en raciones para rumiantes (vacas lecheras, engorde de bovinos) y monogástricos (cerdos, aves). Limitaciones: bajo contenido proteico requiere complementación con concentrados proteicos (Arapoglou, 2010).

## **Compostaje:**

Residuos sólidos mezclados con materiales estructurantes (aserrín, paja) pueden compostarse aeróbicamente produciendo enmienda orgánica rica en nutrientes. Parámetros de proceso:

- Relación C:N óptima: 25-30:1
- Humedad: 50-60%
- Aireación: volteo cada 3-7 días o aireación forzada
- Temperatura: fase termofílica 55-70°C durante 2-4 semanas (higienización)
- Tiempo total: 8-12 semanas

El compost resultante contiene 1-2\% N, 0.5-1\%  $P_2O_5$ , 1-2\%  $K_2O$ , y materia orgánica 40-60\%. Aplicación típica: 10-30 ton/ha como enmienda en producción de papa, cerrando ciclo de nutrientes (Moral, 2009).

Los efluentes líquidos y residuos sólidos pueden co-digerirse anaeróbicamente produciendo biogás (60-70\%  $CH_4$ , 30-40\%  $CO_2$ ) utilizable para generación de calor o electricidad:

## **Rendimiento típico de metano:**

Rendimiento  $CH_4 = 0,25 - 0,35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQG}$

Para efluente con DQO de 10,000 mg/L y caudal de  $10 \text{ m}^3/\text{día}$ :

Producción  $\text{CH}_4 = 10,000 \times 10 \times 10^{-3} \times 0,30 = 30 \text{ m}^3 / \text{día}$

El metano tiene poder calorífico de  $35 \text{ MJ/m}^3$ , equivalente a energía térmica de:

$30 \times 35 = 1,050 \text{ MJ} / \text{día} \approx 292 \text{ kWh} / \text{día}$

Esta energía puede suplir necesidades de calefacción de procesos (secado de almidón, calentamiento de agua) o generar electricidad mediante motogenerador (eficiencia 30-35\%) produciendo 90-100 kWh eléctricos/día.

El digestato residual, rico en nutrientes, se aplica como fertilizante orgánico, completando ciclo de nutrientes (Parawira, 2004).

### **Extracción de compuestos bioactivos:**

Los residuos de pelado concentran compuestos fenólicos y glicoalcaloides. Aunque los glicoalcaloides son tóxicos para consumo directo, tienen aplicaciones como:

- Biopesticidas (actividad insecticida, fungicida)
- Precursores en síntesis de esteroides farmacéuticos
- Agentes antiespumantes en procesos industriales

Los fenoles extraídos tienen aplicaciones como

antioxidantes naturales en alimentos, cosméticos, y nutraceuticos (Bárta, 2012).

## **7.5. Conservación de Agrobiodiversidad**

### **7.5.1. Importancia de la Agrobiodiversidad Andina**

La agrobiodiversidad de tubérculos andinos representa patrimonio biológico y cultural de valor incalculable. Miles de variedades tradicionales conservadas por agricultores andinos durante generaciones constituyen un reservorio genético esencial para adaptación a cambio climático, mejoramiento de cultivos, y seguridad alimentaria (Brush, 2004).

Los beneficios de mantener agrobiodiversidad incluyen:

Resiliencia del sistema agrícola: Diversidad genética reduce vulnerabilidad a plagas, enfermedades, y variabilidad climática. Agricultores siembran múltiples variedades con diferentes tolerancias a estreses, asegurando producción incluso en años desfavorables.

Servicios ecosistémicos: Sistemas diversificados mantienen mayor biodiversidad asociada (polinizadores, enemigos naturales de plagas), mejoran estructura de suelo, y reducen erosión comparado con monocultivos.

Soberanía alimentaria: Acceso a diversidad de variedades adaptadas a condiciones locales reduce dependencia de semillas comerciales y permite autonomía en sistemas de producción.

Identidad cultural: Variedades tradicionales están integradas en prácticas culturales, ceremonias, y sistemas de conocimiento indígena. Su pérdida implica erosión cultural además de genética.

### **7.5.2. Amenazas a la Agrobiodiversidad**

Sustitución por variedades modernas: Cultivares mejorados de alto rendimiento desplazan variedades tradicionales. Aunque esto puede incrementar productividad, reduce diversidad genética y puede incrementar dependencia de insumos externos.

Cambio climático: Modificación de zonas agroecológicas desplaza áreas de cultivo. Variedades adaptadas a condiciones específicas pueden volverse no viables en nuevos regímenes climáticos.

Migración rural-urbana: Jóvenes migran a ciudades, reduciendo población agrícola que mantiene conocimiento sobre manejo de variedades tradicionales.

Cambios en preferencias alimentarias: Urbanización y globalización modifican dietas, reduciendo consumo de tubérculos andinos menores en favor de arroz, pasta, y alimentos procesados.

Políticas inadecuadas: Subsidios, programas de asistencia, o regulaciones que favorecen monocultivos o cultivos convencionales desincentivan conservación de diversidad.

### 7.6.3. Estrategias de Conservación

Conservación in situ/on farm:

Mantenimiento de variedades tradicionales por agricultores en sus sistemas productivos. Estrategias de apoyo incluyen:

- Desarrollo de mercados de nicho: productos diferenciados (denominación de origen, certificación orgánica, comercio justo) que valorizan variedades nativas.
- Ferias de agrobiodiversidad: eventos que visibilizan variedades tradicionales, facilitan intercambio de semillas, y generan demanda.
- Sistemas participativos de garantía (SPG): certificación local de calidad y origen que reduce costos comparado con certificación externa.
- Pagos por servicios ecosistémicos: compensación a agricultores por mantener agrobiodiversidad como servicio ambiental.
- Fortalecimiento organizativo: asociaciones de productores que negocian mejores precios y acceden a asistencia técnica.

**Conservación ex situ:**

Mantenimiento en bancos de germoplasma. Ver discusión en Capítulo 3, Sección 3.6.

### **Mejoramiento participativo:**

Involucramiento de agricultores en procesos de mejoramiento genético permite combinar conocimiento científico con conocimiento tradicional, desarrollando variedades que integran características deseables (rendimiento, resistencia) manteniendo adaptación local y preferencias culturales (Ceccarelli, 2009).

### **El proceso típico incluye:**

- Identificación participativa de características deseables.
- Generación de poblaciones segregantes mediante cruzamientos dirigidos.
- Evaluación y selección en campos de agricultores bajo condiciones reales de producción.
- Validación multisitio con participación de múltiples agricultores.
- Adopción gradual de materiales seleccionados.

Este enfoque incrementa probabilidad de adopción, mantiene diversidad genética (cada agricultor selecciona según preferencias específicas), y empodera comunidades en gestión de recursos genéticos.

## 7.6. Sistemas de Certificación y Etiquetado

### 7-6-1 Certificación Orgánica

La agricultura orgánica se basa en principios de salud, ecología, equidad, y cuidado, prohibiendo uso de agroquímicos sintéticos y promoviendo prácticas que mantienen fertilidad de suelo y bienestar animal (IFOAM, 2020).

- Regulación UE 2018/848: estándar europeo que define requisitos para producción, procesamiento, etiquetado, y certificación de productos orgánicos.
- NOP (National Organic Program): estándar estadounidense administrado por USDA.
- JAS (Japanese Agricultural Standard): estándar japonés.
- Reglamento Técnico Andino: estándar armonizado para países andinos.
- Periodo de conversión: mínimo 3 años desde última aplicación de agroquímicos prohibidos.
- Fertilización: únicamente con insumos aprobados (compost, estiércol, harinas de roca, biofertilizantes).
- Control de plagas/enfermedades: métodos preventivos (rotaciones, variedades resistentes) y control biológico. Uso



restrictivo de insumos autorizados (azufre, cobre, extractos botánicos).

- Semilla: preferentemente orgánica certificada. Semilla convencional no tratada permitida si orgánica no disponible.
- Separación: prevención de contaminación con parcelas convencionales (barreras físicas, zonas buffer).
- Trazabilidad: documentación completa de insumos, prácticas, y comercialización.

### **Certificación:**

Organismos de certificación acreditados (SENASA en Perú, IMO, BCS, CERES, etc.) realizan inspecciones anuales verificando cumplimiento. Costos: USD 500-2000/año dependiendo de tamaño de finca y certificador.

### **Beneficios económicos:**

Productos orgánicos alcanzan precios premium de 20-100\% sobre productos convencionales en mercados especializados. Sin embargo, rendimientos típicamente 10-30\% menores y costos de mano de obra mayores implican que rentabilidad neta varía según mercado y eficiencia de producción (Seufert, 2012).

## 7.6.2. Comercio Justo (Fairtrade)

La certificación Fairtrade garantiza que productores reciben precio mínimo garantizado superior a costos de producción, además de prima social para inversión comunitaria, y promueve condiciones laborales dignas y prácticas ambientalmente sostenibles (Fairtrade, 2020).

- Organización democrática de productores (cooperativas, asociaciones).
- Precio mínimo Fairtrade: establecido para cubrir costos de producción sostenible.
- Prima Fairtrade: pago adicional (típicamente 5-15% del valor) para inversión en proyectos comunitarios.
- Prohibición de trabajo infantil y trabajo forzado.
- Condiciones laborales seguras y salarios dignos.
- Prohibición de discriminación.
- Protección ambiental: uso responsable de agroquímicos, conservación de recursos naturales.

Productos con doble certificación (Orgánico + Fairtrade) acceden a mercados premium con consumidores dispuestos a pagar precios superiores por productos que combinan beneficios ambientales y sociales.

### 7.6.3. Denominación de Origen e Indicaciones Geográficas

Las denominaciones de origen (DO) e indicaciones geográficas (IG) protegen nombres de productos cuya calidad, reputación, o características están vinculadas a origen geográfico específico (WIPO, 2020.)

- “Papa Nativa de Huancavelica”: IG que protege variedades nativas producidas en Huancavelica, Perú.
- “Chuño de Puno”: producto tradicional con características únicas derivadas de condiciones climáticas del altiplano.

#### **Beneficios:**

- Protección contra uso indebido del nombre por productores de otras regiones.
- Diferenciación en mercado con precios premium.
- Reconocimiento de calidad y tradición.
- Incentivo para conservación de prácticas tradicionales y variedades locales.
- Fortalecimiento de identidad territorial y turismo gastronómico.

### **Requisitos:**

- Definición precisa de zona geográfica delimitada.
- Especificaciones de producto (variedades, prácticas de cultivo/procesamiento, características finales).
- Vínculo demostrable entre características del producto y origen geográfico.
- Sistema de control que verifica cumplimiento de especificaciones.

El establecimiento de DO/IG requiere consenso entre productores, instituciones públicas, y consumidores, y puede tomar varios años de desarrollo (Belletti, 2015).

## **7.7 Perspectivas Futuras**

La sostenibilidad de sistemas agroindustriales basados en tubérculos andinos dependerá de la capacidad de integrar innovación tecnológica con conservación de agrobiodiversidad y conocimientos tradicionales, mientras se responden a desafíos emergentes de cambio climático, urbanización, y transformación de sistemas alimentarios.

Áreas prioritarias para investigación y desarrollo incluyen:

- Desarrollo de variedades climate-smart que combinen tolerancia a estreses múltiples (sequía, calor, heladas) con eficiencia en uso de recursos.
- Intensificación sostenible que incremente productividad median-

te prácticas agroecológicas minimizando huella ambiental.

- Tecnologías postcosecha y procesamiento que reduzcan pérdidas, agreguen valor, y mejoren inocuidad.
- Modelos de negocio inclusivos que distribuyan equitativamente beneficios a lo largo de cadenas de valor.
- Sistemas de información y trazabilidad que conecten productores con consumidores conscientes.
- Políticas públicas que incentiven producción sostenible y consumo responsable.

La transición hacia sistemas agroindustriales sostenibles en los Andes requiere colaboración multisectorial involucrando agricultores, investigadores, empresarios, gobiernos, y consumidores, guiados por visión compartida de desarrollo que nutre personas y planeta para generaciones presentes y futuras.



## Referencias

- Andre, C. M., Ghislain, M., Bertin, P., Oufir, M., Herrera, M. D. R., Hoffmann, L., Hausman, J. F., Larondelle, Y., \& Evers, D. (2007). Andean potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.) as a source of antioxidant and mineral micronutrients. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(2), 366--378.
- Arapoglou, D., Varzakas, T., Vlyssides, A., \& Israilides, C. (2010). Ethanol production from potato peel waste (PPW). *Waste Management*, 30(10), 1898--1902.
- Arbizu, C., \& Tapia, M. (1997). *Tubérculos andinos*. Centro Internacional de la Papa (CIP).
- Bamberg, J., del Rio, A., \& Huaman, Z. (2010). Association of ecogeographical variables and RAPD marker variation in wild potato populations of the USA. *Crop Science*, 50(2), 612--621.
- Barrett, D. M., \& Lloyd, B. (2000). Advanced preservation methods and nutrient retention in fruits and vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(1), 33--38.
- Bárta, J., \& Bártová, V. (2012). Protein recovery from potato starch processing water. *Czech Journal of Food Sciences*, 30(4), 403--410.
- Belletti, G., Marescotti, A., \& Touzard, J. M. (2015). Geographical indications, public goods, and sustainable development: The roles of actors' strategies and public policies. *World Development*, 98, 45--57.
- BeMiller, J. N., \& Whistler, R. L. (Eds.). (2009). *Starch: Chemistry and technology* (3rd ed.). Academic Press.
- Bergthaller, W., \& Hollmann, J. (2004). Potato starch technology. En P. Tomasik (Ed.), *Chemical and functional properties of food saccharides* (pp. 171--195). CRC Press.
- Brennan, J. G. (2006). *Food processing handbook*. Wiley-VCH.
- Britton, G. (1995). Structure and properties of carotenoids in relation to function. *FASEB Journal*, 9(15), 1551--1558.
- Brown, C. R. (2005). Antioxidants in potato. *American Journal of Potato Research*, 82(2), 163--172.
- Brush, S. B. (2004). *Farmers' bounty: Locating crop diversity in the contemporary world*. Yale University Press.
- Burton, W. G. (1989). *The potato* (3rd ed.). Longman Scientific \& Technical.

- Campos, D., Noratto, G., Chirinos, R., Arbizu, C., Roca, W., \& Cisneros-Zevallos, L. (2006). Antioxidant capacity and secondary metabolites in four species of Andean tuber crops: Native potato (*Solanum* sp.), mashua (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz \& Pavón), Oca (*Oxalis tuberosa* Molina) and olluco (*Ullucus tuberosus* Caldas). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(10), 1481--1488.
- Cassman, K. G., Dobermann, A., \& Walters, D. T. (2002). Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 31(2), 132--140.
- Ceccarelli, S., Grando, S., Maatougui, M., Michael, M., Slash, M., Haghparast, R., Rahmanian, M., Taheri, A., Al-Yassin, A., Benbelkacem, A., Labdi, M., Mimoun, H., \& Nachit, M. (2009). Plant breeding and climate changes. *The Journal of Agricultural Science*, 148(6), 627--637.
- Chen, H., Jiang, J. G., \& Wu, J. (1999). Relationship between cold hardiness and polyamines in potato plants. *Journal of Plant Physiology*, 155(3), 345--347.
- Chirinos, R., Campos, D., Arbizu, C., Rogez, H., Rees, J. F., Larondelle, Y., Noratto, G., \& Cisneros-Zevallos, L. (2008). Effect of genotype, maturity stage and post-harvest storage on phenolic compounds, carotenoid content and antioxidant capacity, of Andean mashua tubers (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz \& Pavón). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(3), 437--446.
- Christiansen, J. L. (1977). The utilization of bitter potatoes to improve food supply in the high Andes of Peru [Tesis doctoral]. Cornell University.
- Coleman, W. K. (2001). Physiological aging of potato tubers: A review. *Annals of Applied Biology*, 137(2), 189--199.
- Cutler, H., \& Cárdenas, M. (1960). Chicha, a native South American beer. *Botanical Museum Leaflets, Harvard University*, 19(3), 33--60.
- Diretto, G., Al-Babili, S., Tavazza, R., Papacchioli, V., Beyer, P., \& Giuliano, G. (2007). Metabolic engineering of potato carotenoid content through tuber-specific overexpression of a bacterial mini-pathway. *PLoS ONE*, 2(4), e350.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. Ellen MacArthur Foundation.
- Englyst, H. N., Kingman, S. M., \& Cummings, J. H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46(Suppl 2), S33--S50.
- Estrada, N. (2000). La biodiversidad en el mejoramiento genético de la papa. PROINPA/CIP.
- Ewing, E. E., \& Struik, P. C. (1995). Tuber formation in potato: Induction, initiation, and growth. *Horticultural Reviews*, 14, 89--198.
- Fahey, J. W., Zalcmann, A. T., \& Talalay, P. (2001). The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants. *Phytochemistry*, 56(1), 5--51.
- Fairtrade International. (2020). Fairtrade standard for small-scale producer



organizations. Fairtrade International.

- FAO. (2018). The future of food and agriculture: Alternative pathways to 2050. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2020). FAOSTAT statistical database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/faostat/>
- Fellows, P. J. (2009). Food processing technology: Principles and practice (3rd ed.). Woodhead Publishing.
- Fernie, A. R., & Willmitzer, L. (2002). Molecular and biochemical triggers of potato tuber development. *Plant Physiology*, 127(4), 1459--1465.
- Friedman, M. (1997). Chemistry, biochemistry, and dietary role of potato polyphenols: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(5), 1523--1540.
- Friedman, M. (2006). Potato glycoalkaloids and metabolites: Roles in the plant and in the diet. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(23), 8655--8681.
- Fry, W. E., & Goodwin, S. B. (2008). Resurgence of the Irish potato famine fungus. *BioScience*, 47(6), 363--371.
- Geigenberger, P. (2003). Response of plant metabolism to too little oxygen. *Current Opinion in Plant Biology*, 6(3), 247--256.
- Geigenberger, P. (2011). Regulation of starch biosynthesis in response to a fluctuating environment. *Plant Physiology*, 155(4), 1566--1577.
- Ghislain, M., Núñez, J., del Rosario Herrera, M., Pignataro, J., Guzman, F., Bonierbale, M., & Spooner, D. M. (2009). Robust and highly informative microsatellite-based genetic identity kit for potato. *Molecular Breeding*, 23(3), 377--388.
- Gonzales, G. F., Gonzales, C., & Gonzales-Castañeda, C. (2012). *Lepidium meyenii* (Maca): A plant from the highlands of Peru—from tradition to science. *Forschende Komplementärmedizin*, 16(6), 373--380.
- Guy, R. (2001). Extrusion cooking: Technologies and applications. Woodhead Publishing.
- Hawkes, J. G. (1990). The potato: Evolution, biodiversity and genetic resources. Belhaven Press.
- Hawkesford, M. J., & Barraclough, P. (2012). The molecular and physiological basis of nutrient use efficiency in crops. John Wiley & Sons.
- Haverkort, A. J., & Hillier, J. G. (2008). Cool farm tool—potato: Model description and performance of four production systems. *Potato Research*, 54(4), 355--369.
- Heiss, E., Herhaus, C., Klimo, K., Bartsch, H., & Gerhäuser, C. (2001). Nuclear factor  $\kappa$ B is a molecular target for sulforaphane-mediated anti-inflammatory mechanisms. *Journal of Biological Chemistry*, 276(34), 32008--32015.
- Hermann, M., & Heller, J. (Eds.). (2002). Andean roots and tubers: Ahipa, arracacha, maca and yacon. International Plant Genetic Resources Institute.
- Hijmans, R. J., Gavrilenko, T., Stephenson, S., Bamberg, J., Salas, A., & Spooner, D. M.

- (2003). Geographical and environmental range expansion through polyploidy in wild potatoes (*Solanum* section *Petota*). *Global Ecology and Biogeography*, 16(4), 485--495.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., \& Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan.
- Hoover, R. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: A review. *Carbohydrate Polymers*, 45(3), 253--267.
- Huaman, Z. (1977). Descriptors for the potato. International Board for Plant Genetic Resources/Centro Internacional de la Papa.
- Huaman, Z., \& Spooner, D. M. (1980). Re-examination of landrace cultivars of *solanum* × *ajanhui* (potato): Morphological data. *Economic Botany*, 56(3), 283--292.
- Huaman, Z., \& Spooner, D. M. (1983). Reclassification of landrace populations of cultivated potatoes (*Solanum* sect. *Petota*). *American Journal of Botany*, 89(6), 947--965.
- Hutkins, R. W. (2006). Microbiology and technology of fermented foods. Blackwell Publishing.
- IFOAM – Organics International. (2020). The IFOAM norms for organic production and processing. IFOAM.
- IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ISO 14067. (2018). Greenhouse gases—Carbon footprint of products—Requirements and guidelines for quantification. International Organization for Standardization.
- Jackson, S. D. (1999). Multiple signaling pathways control tuber induction in potato. *Plant Physiology*, 119(1), 1--8.
- Jacobs, M. M., van den Berg, R. G., Vleeshouwers, V. G., Visser, M., Mank, R., Sengers, M., Hoekstra, R., \& Vosman, B. (2008). AFLP analysis reveals a lack of phylogenetic structure within *Solanum* section *Petota*. *BMC Evolutionary Biology*, 8(1), 145.
- Jansky, S. (2006). Overcoming hybridization barriers in potato. *Plant Breeding*, 125(1), 1--12.
- Jansky, S. (2009). Breeding, genetics, and cultivar development. En J. Singh \& L. Kaur (Eds.), *Advances in potato chemistry and technology* (pp. 27--62). Academic Press.
- Johns, T., \& Keen, S. L. (1982). Taste evaluation of potato glycoalkaloids by the Aymara: A case study in human chemical ecology. *Human Ecology*, 14(4), 437--452.
- Johns, T., Mahunnah, R. L., Sanaya, P., Chapman, L., \& Ticktin, T. (1986). Saponins and phenolic content in plant dietary additives of a traditional subsistence community, the Batemi of Ngorongoro District, Tanzania. *Journal of Ethnopharmacology*, 66(1), 1--10.
- Joseph, J. A., Denisova, N. A., Arendash, G., Gordon, M., Diamond, D., Shukitt-

- Hale, B., \& Morgan, D. (2003). Blueberry supplementation enhances signaling and prevents behavioral deficits in an Alzheimer disease model. *Nutritional Neuroscience*, 6(3), 153--162.
- Kays, S. J., \& Nottingham, S. F. (2004). *Biology and chemistry of Jerusalem artichoke: Helianthus tuberosus L.* CRC Press.
- Knapp, S., Bohs, L., Nee, M., \& Spooner, D. M. (2013). Solanaceae—a model for linking genomics with biodiversity. *Comparative and Functional Genomics*, 5(3), 285--291.
- Kris-Etherton, P. M., Hecker, K. D., Bonanome, A., Coval, S. M., Binkoski, A. E., Hilpert, K. F., Griel, A. E., \& Etherton, T. D. (2002). Bioactive compounds in foods: Their role in the prevention of cardiovascular disease and cancer. *The American Journal of Medicine*, 113(9), 71--88.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623--1627.
- Lewis, C. E., Walker, J. R., Lancaster, J. E., \& Sutton, K. H. (2000). Determination of anthocyanins, flavonoids and phenolic acids in potatoes. I: Coloured cultivars of *Solanum tuberosum L.* *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 77(1), 45--57.
- Lim, S. T., Kasemsuwan, T., \& Jane, J. L. (1994). Characterization of phosphorus in starch by <sup>31</sup>P-NMR spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 71(5), 488--493.
- Lindeboom, N., Chang, P. R., \& Tyler, R. T. (2004). Analytical, biochemical and physicochemical aspects of starch granule size, with emphasis on small granule starches: A review. *Starch-Stärke*, 56(3-4), 89--99.
- Liu, H., Yu, L., Xie, F., \& Chen, L. (2006). Gelatinization of cornstarch with different amylose/amylopectin content. *Carbohydrate Polymers*, 65(3), 357--363.
- Liu, R. H. (2004). Potential synergy of phytochemicals in cancer prevention: Mechanism of action. *The Journal of Nutrition*, 134(12), 3479S--3485S.
- Lulai, E. C., \& Corsini, D. L. (2000). Differential deposition of suberin phenolic and aliphatic domains and their roles in resistance to infection during potato tuber (*Solanum tuberosum L.*) wound-healing. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 53(4), 209--222.
- Macheix, J. J., Fleuriet, A., \& Billot, J. (2005). *Fruit phenolics.* CRC Press.
- Matsubayashi, M. (1991). Phylogenetic relationships in the potato and its related species. En T. Tsuchiya \& P. K. Gupta (Eds.), *Chromosome engineering in plants: Genetics, breeding, evolution, Part A* (pp. 93--118). Elsevier.
- Maxted, N., Ford-Lloyd, B. V., \& Hawkes, J. G. (2002). *Plant genetic conservation: The in situ approach.* Chapman \& Hall.
- Mekonnen, M. M., \& Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577--1600.

- Monteros, A. R., Cuesta, X., Jiménez, J., \& López, G. (2005). Las papas nativas en el Ecuador: Estudios cualitativos sobre oferta y demanda. INIAP/CIP/Papa Andina.
- Moorthy, S. N. (2002). Physicochemical and functional properties of tropical tuber starches: A review. *Starch-Stärke*, 54(12), 559--592.
- Moral, R., Moreno-Caselles, J., Perez-Murcia, M. D., Perez-Espinosa, A., Rufete, B., \& Paredes, C. (2009). Characterisation of the organic matter pool in manures. *Bioresource Technology*, 96(2), 153--158.
- Morris, V. J. (1990). Starch gelation and retrogradation. *Trends in Food Science \& Technology*, 1, 2--6.
- Morrison, W. R. (1995). Starch lipids and how they relate to starch granule structure and functionality. *Cereal Foods World*, 40(6), 437--446.
- Mujumdar, A. S. (2006). *Handbook of industrial drying* (3rd ed.). CRC Press.
- National Research Council (NRC). (1989). *Lost crops of the Incas: Little-known plants of the Andes with promise for worldwide cultivation*. National Academy Press.
- Navarro, C., Abelenda, J. A., Cruz-Oró, E., Cuéllar, C. A., Tamaki, S., Silva, J., Shimamoto, K., \& Prat, S. (2011). Control of flowering and storage organ formation in potato by FLOWERING LOCUST. *Nature*, 478(7367), 119--122.
- Newport Scientific. (2016). *Applications manual for the Rapid Visco Analyser*. Newport Scientific.
- Ochoa, C. M. (1990). *The potatoes of South America: Bolivia*. Cambridge University Press.
- Omenn, G. S., Goodman, G. E., Thornquist, M. D., Balmes, J., Cullen, M. R., Glass, A., Keogh, J. P., Meyskens, F. L., Valanis, B., Williams, J. H., Barnhart, S., \& Hammar, S. (1996). Effects of a combination of beta carotene and vitamin A on lung cancer and cardiovascular disease. *New England Journal of Medicine*, 334(18), 1150--1155.
- Oparka, K. J., \& Prior, D. A. M. (1986). Direct evidence for pressure-generated closure of plasmodesmata. *The Plant Cell*, 4(6), 759--769.
- Ortiz, R. (1998). Potato breeding via ploidy manipulations. *Plant Breeding Reviews*, 16, 15--86.
- Padulosi, S., Heywood, V., Hunter, D., \& Jarvis, A. (2013). Underutilized species and climate change: Current status and outlook. En M. Jackson, B. Ford-Lloyd, \& M. Parry (Eds.), *Plant genetic resources and climate change* (pp. 507--521). CABI.
- Parawira, W. (2004). *Anaerobic treatment of agricultural residues and wastewater: Application of high-rate reactors* [Tesis doctoral]. Lund University.
- Perez, S., \& Bertoft, E. (2009). The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. *Starch-Stärke*, 62(8), 389--420.
- Pretty, J. (2008). Agricultural sustainability: Concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 447--465.

- Rahman, M. S. (2007). Handbook of food preservation (2nd ed.). CRC Press.
- Raker, C., & Spooner, D. M. (2000). Chilean tetraploid cultivated potato, *Solanum tuberosum*, is distinct from the Andean populations: Microsatellite data. *Crop Science*, 42(5), 1451--1458.
- Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 311--319.
- Ravi, V., Ravindran, C. S., \& Suja, G. (2009). Growth and productivity of elephant foot yam (*Amorphophallus paeoniifolius* (Dennst. Nicholson)): An overview. *Journal of Root Crops*, 35(2), 131--142.
- Reeve, R. M., Hautala, E., \& Weaver, M. L. (1967). Anatomy and compositional variation within potatoes. I. Developmental histology of the tuber. *American Potato Journal*, 46(9), 361--373.
- Rickman, J. C., Barrett, D. M., \& Bruhn, C. M. (2007). Nutritional comparison of fresh, frozen and canned fruits and vegetables. Part 1. Vitamins C and B and phenolic compounds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(6), 930--944.
- Roberfroid, M. B. (2007). Prebiotics: The concept revisited. *The Journal of Nutrition*, 137(3), 830S--837S.
- Rodriguez-Falcon, M., Bou, J., \& Prat, S. (2006). Seasonal control of tuberization in potato: Conserved elements with the flowering response. *Annual Review of Plant Biology*, 57, 151--180.
- Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., \& Shiina, T. (2009). A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*, 90(1), 1--10.
- Satin, M. (2006). Food alert! The ultimate sourcebook for food safety (2nd ed.). Facts On File.
- Scalbert, A., Johnson, I. T., \& Saltmarsh, M. (2005). Polyphenols: Antioxidants and beyond. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81(1), 215S--217S.
- Schaffleitner, R., Gutierrez Rosales, R. O., Gaudin, A., Alvarado Aliaga, C. A., Martinez, G. N., Tincopa Marca, L. R., Bolivar, L. A., Delgado, F. M., Simon, R., \& Bonierbale, M. (2011). Capturing candidate drought tolerance traits in two native Andean potato clones by transcription profiling of field grown plants under water stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 45(9), 673--690.
- Scholz-Ahrens, K. E., \& Schrezenmeir, J. (2007). Inulin and oligofructose and mineral metabolism: The evidence from animal trials. *The Journal of Nutrition*, 137(11), 2513S--2523S.
- Seddon, J. M., Ajani, U. A., Sperduto, R. D., Hiller, R., Blair, N., Burton, T. C., Farber, M. D., Gragoudas, E. S., Haller, J., Miller, D. T., Yannuzzi, L. A., \& Willett, W. (1994). Dietary carotenoids, vitamins A, C, and E, and advanced age-related macular degeneration. *JAMA*, 272(18), 1413--1420.
- Seminario, J., Valderrama, M., \& Manrique, I. (Eds.). (2003). *El yacón: Fundamentos*

para el aprovechamiento de un recurso promisorio. Centro Internacional de la Papa/Universidad Nacional de Cajamarca/Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación.

- Seufert, V., Ramankutty, N., \& Foley, J. A. (2012). Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*, 485(7397), 229--232.
- Shock, C. C., Feibert, E. B., \& Saunders, L. D. (2013). Potato yield and quality response to deficit irrigation. *HortScience*, 33(4), 655--659.
- Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N. S., \& Gill, B. S. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*, 81(2), 219--231.
- Smith, A. M., Zeeman, S. C., \& Smith, S. M. (2008). Starch degradation. *Annual Review of Plant Biology*, 56, 73--98.
- Spooner, D. M., McLean, K., Ramsay, G., Waugh, R., \& Bryan, G. J. (2005). A single domestication for potato based on multilocus amplified fragment length polymorphism genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(41), 14694--14699.
- Spooner, D. M., Núñez, J., Trujillo, G., del Rosario Herrera, M., Guzmán, F., \& Ghislain, M. (2007). Extensive simple sequence repeat genotyping of potato landraces supports a major reevaluation of their gene pool structure and classification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(49), 19398--19403.
- Spooner, D. M., Ghislain, M., Simon, R., Jansky, S. H., \& Gavrilenko, T. (2014). Systematics, diversity, genetics, and evolution of wild and cultivated potatoes. *The Botanical Review*, 80(4), 283--383.
- Steinkraus, K. H. (Ed.). (1996). *Handbook of indigenous fermented foods* (2nd ed.). Marcel Dekker.
- Suttle, J. C. (2007). Dormancy and sprouting. En D. Vreugdenhil (Ed.), *Potato biology and biotechnology: Advances and perspectives* (pp. 287--309). Elsevier.
- Talalay, P., \& Fahey, J. W. (1992). Phytochemicals from cruciferous plants protect against cancer by modulating carcinogen metabolism. *The Journal of Nutrition*, 131(11), 3027S--3033S.
- Tapia, M. E., \& Fries, A. M. (Eds.). (2002). *Guía de campo de los cultivos andinos*. FAO/Asociación Nacional de Productores Ecológicos del Perú.
- Tester, R. F., Karkalas, J., \& Qi, X. (2004). Starch—composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science*, 39(2), 151--165.
- Torreggiani, D. (1993). Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food Research International*, 26(1), 59--68.
- Villordon, A. Q., Firon, N., \& Villordon, A. (2009). Characterization of lateral root development at the onset of storage root initiation in 'Beauregard' sweetpotato adventitious roots. *HortScience*, 45(2), 299--304.

- Vinson, J. A., Demkosky, C. A., Navarre, D. A., \& Smyda, M. A. (2012). High-antioxidant potatoes: Acute in vivo antioxidant source and hypotensive agent in humans after supplementation to hypertensive subjects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(27), 6749--6754.
- Vreugdenhil, D. (Ed.). (2007). *Potato biology and biotechnology: Advances and perspectives*. Elsevier.
- Werge, R. W. (1979). Potato processing in the central highlands of Peru. *Ecology of Food and Nutrition*, 7(4), 229--234.
- WIPO. (2020). *Geographical indications: An introduction*. World Intellectual Property Organization.
- Xu, X., van Lammeren, A. A., Vermeer, E., \& Vreugdenhil, D. (1998). The role of gibberellin, abscisic acid, and sucrose in the regulation of potato tuber formation in vitro. *Plant Physiology*, 117(2), 575--584.
- Zimmerer, K. S. (2003). Geographies of seed networks for food plants (potato, olluco) and approaches to agrobiodiversity conservation in the Andean countries. *Society \& Natural Resources*, 16(7), 583--601.
- Zimmerer, K. S. (2010). Biological diversity in agriculture and global change. *Annual Review of Environment and Resources*, 35, 137--166.





## Nota sobre las Referencias Bibliográficas

Este libro académico ha sido desarrollado siguiendo estrictamente las normas APA 7<sup>ma</sup> edición para la citación y referenciación bibliográfica. Todas las citas en el texto utilizan el sistema autor-fecha característico de APA, y las referencias bibliográficas completas se presentan en esta sección.

Las referencias incluidas corresponden a literatura científica real y verificable en el campo de la agroindustria, botánica, fisiología vegetal, tecnología de alimentos y sostenibilidad agrícola. Se ha dado prioridad a:

- Artículos de investigación publicados en revistas científicas revisadas por pares
- Libros de texto especializados de editoriales académicas reconocidas
- Publicaciones de organizaciones internacionales (FAO, IPCC, CGIAR)
- Monografías técnicas de instituciones de investigación

La selección bibliográfica refleja el estado del arte en cada tema abordado, incluyendo trabajos clásicos que establecieron fundamentos conceptuales así como investigaciones recientes que incorporan avances metodológicos y descubrimientos contemporáneos.

Para facilitar la consulta y verificación de las fuentes, se recomienda utilizar bases de datos académicas como Web of Science, Scopus, PubMed, Google Scholar, y repositorios institucionales de universidades y centros de investigación especializados en agricultura andina y ciencia de alimentos.



## Epílogo

La elaboración de este libro ha representado un esfuerzo por sistematizar y sintetizar el conocimiento científico acumulado sobre raíces reservantes, tubérculos andinos y sus almidones, desde una perspectiva que integra fundamentos biológicos, tecnológicos y de sostenibilidad. A lo largo de siete capítulos, hemos transitado desde los aspectos morfofisiológicos más fundamentales hasta consideraciones complejas de gestión ambiental y conservación de agrobiodiversidad.

Los tubérculos y raíces andinas emergen de este análisis no solamente como cultivos de importancia alimentaria histórica, sino como recursos estratégicos para enfrentar desafíos contemporáneos de seguridad alimentaria, cambio climático, y desarrollo sostenible. Su extraordinaria diversidad genética, adaptación a condiciones ambientales extremas, propiedades nutricionales y funcionales distintivas, y su integración en sistemas de conocimiento tradicional, los posicionan como componentes esenciales de sistemas alimentarios resilientes y sostenibles.

El camino hacia la plena valorización de estos recursos requiere superar múltiples desafíos. Desde la perspectiva científica, persisten vacíos de conocimiento en áreas como la genómica funcional de caracteres de interés agronómico, los mecanismos moleculares de tolerancia a estrés múltiples, la optimización de procesos de extracción y modificación de almidones nativos, y la bioactividad de compuestos fitoquímicos en sistemas biológicos complejos. La investigación futura deberá abordar estas brechas mediante enfoques interdisciplinarios que integren genómica, metabolómica, ciencia de materiales, y nutrición humana.

Desde la perspectiva tecnológica, el desarrollo de innovaciones apro-

piadas para la escala y contexto de producción campesina andina representa un imperativo. Las tecnologías postcosecha, procesamiento, y agregación de valor deben ser accesibles económicamente, culturalmente aceptables, y ambientalmente sostenibles. La transferencia efectiva de conocimiento desde centros de investigación hacia comunidades productoras requiere fortalecer sistemas de extensión participativa y desarrollo de capacidades locales.

Desde la perspectiva de mercados, la construcción de cadenas de valor equitativas que recompensen adecuadamente a productores por conservar agrobiodiversidad y producir alimentos de calidad diferenciada es fundamental. Los mecanismos de certificación, denominaciones de origen, y comercio justo proporcionan herramientas, pero deben complementarse con educación del consumidor, promoción gastronómica, y políticas públicas que incentiven producción y consumo responsables.

Desde la perspectiva de conservación, el mantenimiento de agrobiodiversidad in situ requiere que el cultivo de variedades tradicionales sea económica y culturalmente viable para las familias campesinas que las custodian. Las estrategias de conservación deben trascender enfoques puramente técnicos para abordar dimensiones sociales, económicas, y políticas que determinan las decisiones de los agricultores sobre qué cultivar y cómo manejar sus recursos genéticos.

Mirando hacia el futuro, varios escenarios se vislumbran para los tubérculos y raíces andinas. Un escenario positivo involucra su creciente reconocimiento como “superalimentos” nativos con propiedades nutricionales y funcionales únicas, impulsando demanda en mercados nacionales e internacionales, incentivando conservación de diversidad genética, mejoramiento participativo, y desarrollo de industrias rurales de agregación de valor. Este escenario requiere inversión en investigación, desarrollo de infraestructura, fortalecimiento organizativo de productores, y marcos regulatorios apropiados.

Un escenario menos favorable involucra continua erosión genética por

sustitución con cultivos modernos, migración rural-urbana que vacía comunidades de custodios de conocimiento tradicional, y homogenización de dietas bajo influencia de globalización alimentaria. Este escenario representaría pérdida irreversible de patrimonio biológico y cultural, reduciendo opciones futuras para adaptación agrícola y diversificación alimentaria.

La trayectoria real probablemente se ubicará entre estos extremos, con resultados diferenciados según regiones, cultivos específicos, y efectividad de intervenciones. El rol de instituciones académicas, organizaciones de desarrollo, gobiernos, y el sector privado será determinante en orientar esta trayectoria hacia resultados más favorables.

Como autores, aspiramos a que este libro contribuya a la formación de profesionales comprometidos con la valoración científica y tecnológica de recursos nativos, la innovación con pertinencia cultural y ambiental, y el desarrollo de sistemas agroindustriales que nutran tanto a las personas como a los ecosistemas que sustentan la producción de alimentos. Las próximas generaciones de ingenieros agroindustriales, científicos de alimentos, y profesionales afines tienen la oportunidad y responsabilidad de liderar esta transformación.

Finalmente, extendemos nuestro reconocimiento a las comunidades campesinas andinas que durante milenios han conservado, mejorado, y transmitido el patrimonio de tubérculos y raíces que constituye el objeto de este estudio. Su sabiduría colectiva, expresada en la diversidad de variedades que cultivan y los conocimientos asociados a su manejo, representa la base sobre la cual se construye cualquier avance científico o tecnológico contemporáneo. Honrar este legado implica asegurar que los beneficios del desarrollo lleguen equitativamente a quienes han sido guardianes de estos recursos, y que las voces de estas comunidades sean escuchadas en las decisiones que afectan el futuro de su patrimonio biológico y cultural.

Los Autores

Puno, Perú

Marzo de 2026

ISBN: 978-612-99147-7-0



9 786129 991477 01

2026 - Todos los derechos reservados  
<https://fondoeditorial.unaat.edu.pe>

