

## Desarrollando un Paradigma para una Adopción Segura de Cultivos Genéticamente Modificados con un Enfoque de Pobreza: Resistencia a Nematodos de Papa en Bolivia<sup>1</sup>

Howard J. Atkinson<sup>2</sup>, Jayne Green<sup>2</sup>, Sue Cowgill<sup>2</sup>,  
Peter Urwin<sup>2</sup>, Javier Franco<sup>3</sup> y John Witcombe<sup>4</sup>

### Resumen

El rol de la inversión de fondos públicos para el bienestar público orientado al mundo en desarrollo ha sido lamentablemente ignorado. En su lugar, argumentos sobre-simplificados de que existe suficiente alimento en el mundo y que la redistribución es consecuentemente la solución, han sido puestos al frente, sin considerar las complejidades involucradas en la redistribución, la creciente población, una declinación de recursos, y los riesgos de epidemias que conducen a caídas en la producción. En lugar de la dependencia que crearía la redistribución, el mejor camino para evitar la pobreza de la población rural es el proporcionarles medios para mejorar su producción. Se describe un ejemplo de cómo los cultivos transgénicos financiados con fondos públicos pueden solucionar en forma segura una necesidad del mundo en desarrollo y beneficiar a los pobres. Bolivia está entre los cinco países en el mundo con el más bajo consumo de calorías per cápita. Las presiones de la población son severas, y los resultados incluyen la degradación del suelo, fragmentación y migración del campo hacia las ciudades. Una creciente necesidad por la tierra ha guiado a la búsqueda por tierras cultivables en la región Amazónica. La papa es el alimento de consumo más importante pero las pérdidas por nematodos son considerables. La modificación genética para desarrollar resistencia a nematodos proporcionaría una vía segura de poner los medios necesarios para incrementar la producción en las manos de los agricultores pobres.

*Palabras claves adicionales:* mejoramiento de la producción, cultivos Transgénicos, lucha contra la pobreza, control de nematodos, seguridad alimentaria

1 Traducción de versión original en inglés publicada en Sustainable Agriculture in the New Millennium: The Impact of Biotechnology in Developing Countries. Brussel, Belgium, May 2000.

2 Centro de Ciencias de Plantas, Universidad de Leeds, Leeds LS2 9JT, Reino Unido.

3 PROINPA, Casilla 4285, Cochabamba, Bolivia.

4 Centro Para Estudios de Zonas Áridas, University of Wales, Bangor, LL57 2UW, Reino Unido.

## **Developing a Paradigm for Secure Adoption of Genetically Modified Crops Focusing Poverty: Resistance to Potato Nematodes in Bolivia**

### **Summary**

The debate on genetically modified (GM) crops has balanced the perceived risks of the current range of private-sector GM crops, grown mostly in the developed world, against their benefits that accrue largely to producers rather than consumers. The role of publicly funded investment for the public good targeted at the developing world has been largely ignored. Instead, over simplistic arguments that there is enough food in the world and redistribution is therefore the solution have been put forward, without regard to the complexities involved in redistribution, the growing population, a declining resource base, and the risks of epidemics that leads to shortfalls in production. Instead of dependency-creating redistribution, the best pathway from poverty for the rural poor is to provide them with the means of increased production. It is describe here an example of how publicly funded transgenic crops can safely meet a developing world need and benefit of the poor. Bolivia is among the five countries in the world with the lowest per capital calorie intake. Population pressures are severe, and the results include land degradation, fragmentation and outward-migration to towns. A growing need for land has lead to a search for cultivable land in the Amazon basin. Potato is the most important staple food but losses to nematode pests are considerable. Genetic modification to create resistance to nematodes would provide a safe way of putting the means of increased production into the hands of the poor.

*Additional index words:* production improvement, transgenic crops, fight against poverty, nematode control, food security

### **Introducción**

Uno de los retos más importantes para el nuevo siglo es la seguridad alimentaria para todos conforme la población mundial continua incrementándose. Mejorar la distribución de alimentos es un tema importante para los países en vías de desarrollo, pero una mayor producción de alimentos por los pobres, que no requiera redistribución, es también esencial. Nosotros proporcionamos un ejemplo de cómo los

cultivos transgénicos pueden responder en forma segura a una importante necesidad de los países en vías de desarrollo, con grandes beneficios para los pobres. Por esto es necesaria la resistencia a nematodos en papa y está dirigida, primordialmente, para los agricultores nativos pobres de Bolivia.

### **La Necesidad de un Control de Nematodos en Papa Dentro de un Contexto Agrícola Boliviano**

Bolivia tiene el más bajo PBI (Producto Bruto Interno) en Sudamérica, y el IFAD (International Fund for Agricultural Development) y la ONU (Organización de las Naciones Unidas) estima que el 97% de la población rural de Bolivia vive en extrema pobreza, una proporción que se compara desfavorablemente aun con los países más pobres del África (15). Tiene uno de los más bajos consumos de calorías per cápita del mundo (6), y con una tasa de crecimiento poblacional de 2.3% por año que incrementará la población por más del 50% para el año 2020 (14). Las regiones altas del altiplano y los valles interandinos están poblados por agricultores con pequeñas propiedades resultantes de la Reforma Agraria ocurrida en 1952.

La papa es el principal alimento de la dieta de los bolivianos. Proporciona el 25% del consumo de productos agrícolas de los pobladores bolivianos que representa del 3 al 13% de sus gastos, dependiendo de la clase social. La papa proporciona 40-50% de las calorías consumidas por los pobladores rurales de las regiones altas. El cultivo de la papa cubre el 11% del total de tierras agrícolas con más de 400,000 pequeñas familias de agricultores que trabajan la tierra. Las dos principales áreas productoras de papa están localizadas en el altiplano y los valles interandinos de los departamentos de La Paz y Cochabamba, respectivamente. La propiedad promedio de los agricultores de subsistencia en estas áreas es aproximadamente de 0.4 ha por familia, lo cual representa sólo el 25% del promedio de la propiedad nacional (13).

Los sistemas tradicionales del cultivo de papa en Bolivia se basan en bajos costos de inversión y obtienen rendimientos bajos. Ellos carecen de fondos para la compra de plaguicidas (nematicidas son inapropiados para una agricultura de subsistencia), pero los agricultores invierten necesariamente en semilla, ya sea por que la compran o usan tubérculos almacenados por ellos mismos.

### **La situación de los nematodos de la papa como plaga en Bolivia**

La plaga de nematodos está representada por *Globodera* spp. (Nematodo Quieste de la Papa, NQP) y *Nacobbus aberrans* (Falso Nematodo del Nódulo o Nematodo del Rosario) que se presentan en forma conjunta o individual en el 91% de las áreas destinadas al cultivo de papa en el departamento de Cochabamba (7). Hay una prevalencia similar en otras áreas tradicionales de cultivo en Bolivia. Un tercer problema de nematodos, es *Meloidogyne* spp., que está presente en áreas por debajo de los 2000 m sobre el nivel del mar y últimamente en ciertas áreas por encima de este nivel.

El personal técnico de PROINPA (antes Programa de Investigación de la Papa) ubicó al NQP como la tercera plaga más importante en ese país. Este es el estimado disponible más confiable de la gran importancia de los nematodos en el cultivo de papa en Bolivia. Los nematodos no presentan síntomas típicos o específicos a densidades dañinas, a menudo no se dispone de un sistema de extensión o el material preparado con este fin, no puede ser leído por muchos de los agricultores, ya que aproximadamente el 36% son analfabetos. Sólo el 22% de los productores de papa recibe algo de asistencia técnica y las rotaciones de cultivos y el descanso de la tierra son las prácticas agrícolas tradicionales que permiten una reducción del daño causado por nematodos. En una encuesta efectuada antes de la campaña agrícola 1989/90, se encontró que casi todos los agricultores (99%) practicaban la rotación de cultivos. El 34% de los productores de papa habían dejado descansando sus tierras por tres años antes de sembrar papas en la campaña agrícola 1989/90. Estas prácticas no son solamente para el control de nematodos, sin embargo ellas si son probablemente una respuesta tradicional a la presencia de los nematodos como resultado de observar que las pérdidas en el rendimiento son causadas por el intenso monocultivo de papa (2).

Los nemátodos y otras limitantes del cultivo, resultan en un rendimiento promedio de papa en Cochabamba de sólo 5 t/ha (17). Esto aproximadamente sólo representa el 20% de lo que podría obtenerse en Bolivia. Las pérdidas por nematodos determinan que las áreas de los pequeños productores tradicionales de papa sean el doble de lo que realmente requerirían. Un mejor control de nematodos liberaría tierras para otros cultivos, tales como leguminosas que ofrecen una mejora nutricional para la población rural pobre.

## **Manejo de nematodos de la papa en las tierras altas de Bolivia**

Nosotros conformamos el único esfuerzo colaborativo internacional que está estudiando el problema de nematodos en Bolivia. Es nuestra opinión que esta resistencia de plantas GM posee importantes ventajas, sin dejar de lado la simplicidad, los menores costos y la compatibilidad con el medio ambiente. Sin embargo, no nos adherimos a ningún dogma ya que diferentes componentes para reducir las poblaciones de nematodos e incrementar la producción serán utilizados complementariamente. Es así que también hemos identificado componentes no relacionados a plantas GM que pueden ayudar a disminuir las actuales pérdidas bajo un esquema de manejo integrado. La situación difiere para los dos importantes problemas de nematodos. *N. aberrans* es un importante problema sólo en Bolivia, porque no se presenta en ninguna otra área o región papera de

mundo. Esto sugiere que existen factores específicos en Bolivia que propician esta situación. Este nematodo posee una amplia gama de hospedantes. Nuestro trabajo en la actualidad implica el estudio de malezas, tal como *Spergula arvensis* que favorece la presencia de altos niveles poblacionales del nematodo que afectarán el posterior cultivo de papa. Por lo tanto, un futuro mejor control del nematodo será posible por un mejor control de esta maleza. *S. arvensis* fue accidentalmente introducida a Sudamérica y constituye un ejemplo de cómo un genoma completo introducido puede poseer un riesgo ambiental. En este caso, el riesgo no pudo ser anticipado, ya que este nematodo no es problema económico donde *S. arvensis* ocurre naturalmente. Por razones mal fundamentadas en la ciencia y contrarias a la experiencia, algunos activistas ambientales enfocan su preocupación en posibles peligros de transgenes y olvidan o dejan de lado los riesgos de la introducción de genomas completos.

Los NQP son la mayor plaga para el cultivo de la papa en Bolivia (7). Ellos son plagas altamente específicas y atacan solamente a la papa. Las hembras se desarrollan y nuevos huevos se forman después de que los segundos estados juveniles infectivos se establecen en una papa susceptible. A diferencia de otras muchas plagas la magnitud de pérdidas en el rendimiento pueden predecirse de acuerdo a los niveles poblacionales del nematodo antes del sembrado de la papa. El incremento de huevos que ocurre después de un cultivo susceptible de papa es contrareestado por la declinación natural de la población de huevos en dormancia cuando la papa susceptible no es cultivada. Esta declinación en la población durante una rotación de cultivos no hospedantes o descanso del suelo se considera ser normalmente de naturaleza exponencial y se expresa anualmente. Una reducción típica para prevenir el daño al cultivo de la papa es de 33% por año. Muchas de las poblaciones del NQP que ocurren en casi la mitad de los campos de papa del departamento de Cochabamba están a niveles poblacionales mayores de 35 huevos viables por gramo de suelo a la siembra del cultivo de papa. Los agricultores tradicionales usan una rotación de 3 a 4 años y consecuentemente son necesarios 2 ó más años para conseguir que una rotación sea suficientemente larga para evitar el daño. Por lo tanto, extender las rotaciones para limitar el daño producido por los NQP no es siempre una opción efectiva porque se dispondría de áreas menores que abastezcan a un pequeño agricultor y su familia. Hemos demostrado que dos cultivos bolivianos tradicionales, lupinos (*Lupinus mutabilis*) y quinua (*Chenopodium quinoa*), pueden favorecer la declinación de las tasas del NQP cuando estos se incluyen en una rotación, pero ellos no son sustitutos populares del cultivo de haba o de la cebada. Sólo los cultivares Gendarme y María Huanca proporcionan una baja multiplicación del NQP que permiten rotaciones de 3 y 4 años que no incrementan a niveles poblacionales dañinos de *G. rostochiensis*. El popular cultivar Waycha permitiría un incremento en los niveles poblacionales de daño en una rotación de 3-4 años (2).

Hay material con resistencia natural disponible a *N. aberrans* (ej. Gendarme) y a *Globodera pallida*/*G. rostochiensis* (por ejemplo la variedad María Huanca) obtenida a través de numerosos trabajos de selección y mejoramiento genético. Desafortunadamente estas resistencias colapsan cuando ambos nematodos están presentes. La resistencia basada en GM favorecerá la durabilidad de las resistencias naturales de estos cultivares. En adición, incrementará los rendimientos del popular cultivar Waycha, así como también de la variedad Desiree que los agricultores tradicionales están usándola en reemplazo de variedades nativas. El incremento de Desiree no está dirigido con un fin comercial, ya que el sistema formal de producción de semilla que provee esta variedad sólo cubre el 2% de la semilla sembrada en Bolivia.

### **Respuesta a los Riesgos Percibidos de los Cultivos Genéticamente Modificados en Relación a la Resistencia a Nematodos**

#### **Temas éticos con relación a la transferencia de genes entre organismos**

La introducción de genes de otros organismos a plantas presenta problemas éticos para algunos grupos religiosos. Sin embargo, la transferencia de genes sí ocurre naturalmente entre plantas. Triticale es un cultivo que se siembra en Bolivia, el cual es un híbrido producido por mejoramiento genético entre centeno (*Lolium* sp.) y trigo (*Triticum vulgare*). El mejoramiento tradicional de plantas también ha introducido muchos genes de centeno en el trigo, del cual es preparado nuestro pan. Nosotros no compartimos las preocupaciones o percepciones éticas sobre la transferencia de genes pero sí apoyamos el uso de genes de plantas en cultivos GM para evitar las percepciones o riesgos que resulten de la transferencia de genes entre diferentes reinos. La propuesta o estrategia es apropiada para Bolivia y es consistente con el punto de vista del Vaticano, que el desarrollo de cultivos GM no da lugar a preocupaciones éticas para el Catolicismo Romano (3).

#### **Evitando nueva toxicidad o alergenicidad de los alimentos**

Cualquier tipo de toxicidad o alergenicidad asociada a los alimentos es universal para toda la población humana. Por lo tanto, nosotros consideramos que aquellos caracteres de los cultivos GM que han sido aprobados o aceptados para su uso en el mundo desarrollado deben también ser considerados por su valor en el mundo en vías de desarrollo. Nosotros también coincidimos con el punto de vista de que los compuestos que requieren una mayor atención particular son aquellos que sean nuevos a la dieta o que se presenten en mayor concentración a la que se encontraba anteriormente. Ambos, la modificación genética y el

mejoramiento tradicional pueden producir nuevas proteínas o incrementar su concentración, por lo tanto, el tema debe ser el producto y no así el proceso por el cual se ha mejorado una planta.

Nuestro trabajo involucra cinco importantes líneas que garantizan la seguridad de los alimentos. La primera es que los inhibidores de proteasas de la cisteína (cistatinas) que usamos para conferir la resistencia a nematodos ya ocurre en alimentos vegetales tales como las semillas de arroz, maíz y girasol. Ellos actúan sobre los nematodos al impedir que la proteasa de la cisteína presente en el intestino del nematodo digiera la proteína. Consecuentemente el nematodo hembra crece menos y su producción de huevos es reducida. Las cistatinas producen efectos similares en ciertos invertebrados.

La segunda línea de seguridad es que las cistatinas carecen de efectos tóxicos sobre los mamíferos y aves. Los humanos no usamos estas proteasas de cisteína como enzimas digestivas (las proteasas del sistema digestivo de los humanos no son inhibidas por las cistatinas). Estos inhibidores también carecen de alergenicidad, una cistatina funcionalmente similar ocurre en nuestra saliva y nosotros tragamos 40  $\mu$ g/minuto de esta cistatina cuando masticamos un alimento (16). Las cistatinas han sido también propuestas como un aditivo alimenticio y como componente de productos para el cuidado dental.

El tercer aspecto de seguridad es que no es necesario que la proteína producida por el transgen sea expresado en los tubérculos. Los nematodos que buscamos controlar, normalmente se presentan en las raíces. Ha sido identificada una gama de promotores específicos para las raíces que pueden limitar la expresión del transgen únicamente a las raíces. El nivel de cistatina presente en una futura papa transgénica está muy por debajo de los niveles de cistatina presentes en la saliva cuando una papa transgénica es comida.

Un cuarto aspecto de bioseguridad es el referente a un riesgo relativo. Las toxinas naturales de los tubérculos de papa son particularmente prevalentes en tubérculos y tejidos verdeados y que son conocidos de ser dañinos para los humanos. El mejoramiento convencional de papa ha producido por lo menos una variedad con altos y fatales niveles de toxinas naturales para animales que consumieron tubérculos crudos. De las calorías totales que consumen los bolivianos casi el 50% de estas provienen de la papa (10) y el tema de altos niveles de toxinas naturales en plantas de papa creciendo bajo condiciones de estrés, incluyendo el de nematodos, es importante de estudiar en Bolivia.

Un quinto aspecto es que las cistatinas no son estables en el calor. El cocimiento es una práctica universal que las destruye. El cocimiento es esencial para eliminar las toxinas naturales de los tubérculos y, en todo caso, las papas crudas son extremadamente no apetecibles para los humanos.

Por lo tanto, consideramos que hay suficientes evidencias para sugerir que las cistatinas no representan riesgo alguno de toxicidad o alergenicidad para los humanos. Sin embargo, las investigaciones continúan para respaldar la bioseguridad de las cistatinas en los alimentos. Esta información será proporcionada a las autoridades reguladoras competentes antes de que se lleve a cabo el cultivo no experimental de esta papa GM.

### **Posible riesgo ecológico por el escape de transgenes**

Preocupación ha sido expresada indicando que la introducción de nuevos caracteres en especies de cultivos podría alterar su estabilidad e invadir hábitats naturales. Sin embargo, la papa no es un cultivo-maleza y no persiste en los campos bolivianos y debe ser re-plantada para cada nuevo cultivo. Los riesgos ecológicos podrían ser posibles si el gen es transferido a otro organismo y esto es posteriormente cubierto en mayor detalle para las papas en Bolivia. Ambas amenazas potenciales varían con el cultivo y la región geográfica considerada.

Las plantas de papa en un valle andino forman una población con un flujo de genes entre plantas en pequeños campos e hibridan a otras especies de *Solanum* (ver el recuadro). Lo último puede ocurrir dentro de los campos, en sus bordes y/o en áreas no cultivadas. Las montañas altas probablemente aislen una población de otra. El amplio rango de plantas sexualmente compatibles en la región ha sido determinado (8). La polinización es por insectos, particularmente abejas y por lo tanto, las características de dispersión variarán entre localidades. La mezcla de otras especies de *Solanum* disponibles para la polinización por papa varía con la localidad y es ecológicamente compleja.

#### **Flujo de genes entre especies cultivadas y silvestres de *Solanum***

*Solanum tuberosum* (papa) es un tetraploide de propagación vegetativa ( $2n=4x=48$ ) que pertenece a una de las cuatro principales ramas dentro del grupo taxonómico de la Sección Petota del género *Solanum* (12). Es la misma rama a la que pertenecen varios miembros diploides y poliploides de los Andes Centrales. La amplitud de polinización cruzada con otras solanáceas depende primeramente de la compatibilidad estilar, y del número de balance endospermico (EBN, ploidía efectiva de cruzamiento, ej. 4EBN para papa). Se cruza más fácilmente con especies 4X (4EBN) y 6x (6EBN) aunque podrían existir barreras interespecíficas adicionales actuando al nivel pre- y post-cigote (9). La papa también produce algunos haploides 2x (2EBN) que les permite hibridarse con plantas 2x (2EBN). La fertilidad de la hembra en la papa cultivada puede resultar también en cruzamientos de plantas silvestres con la cultivada, pero plantas derivadas de semilla sexual o verdadera, en muchos casos son identificadas por los agricultores como malezas y son normalmente eliminadas.



El término "contaminación genética" fue originalmente definido para la transferencia de genes entre dos organismos sexualmente compatibles (perro y lobo). El término podría ser aplicado con relación a la papa en Bolivia igualmente para productos de la manipulación convencional y transgénica de la papa. La introgresión de ADN ("polución de genes") (4) de la papa a otras especies de *Solanum* ya ocurre bajo condiciones naturales de campo (ver recuadro), pero los híbridos son usualmente menos adaptados localmente que los progenitores y ellos no persisten por varias generaciones.

Entonces es una realidad que la transferencia de ambos, genes naturales y transgenes ocurriría hacia las plantas silvestres. Este nunca ha sido un tema considerado por el mejoramiento tradicional de plantas. Nuevos genes introducidos a la papa desde diferentes especies presentes en otras regiones geográficas, como la Argentina, son posibles de haber ocurrido por introgresión a especies silvestres (11). En este aspecto ninguna preocupación ha sido expresada y no se han encontrado evidencias de daño alguno.

En el actual ambiente de irracionalidad científica tendríamos que adoptar estándares más altos de bioseguridad que los previamente demandados para el mejoramiento convencional de plantas. Para la papa esto puede conseguirse a través de la esterilidad. Muchos cultivares que se cultivan en Europa son andro o macho estériles y algunas aun no forman flores (5). Esto no es una desventaja agrícola ya que la semilla que el agricultor almacena está basada sólo en los tubérculos y no en la semilla sexual o verdadera de la papa. El flujo de genes puede ser eliminado por la introducción de transgenes a cultivares que no produzcan flores o reducirlo marcadamente por la introducción de ellos en cultivares que sean machos estériles. El cultivar Desiree produce flores menos intensamente en las zonas altas de Bolivia que en Europa, donde ocurren días largos durante el verano. Sin embargo el uso de tales plantas ofrece sólo una solución parcial al problema planteado. Los agricultores de la región andina tienden a cultivar y prefieren consumir diferentes cultivares de otras sub-especies o especies de papa como *S. tuberosum* ssp. *andigena* (10). Casi todos estos cultivares son machos fértiles y producen flores bajo las condiciones de días cortos que ocurren en los Andes Centrales. Por lo tanto, es una ventaja el desarrollar plantas de papa andro-estériles a partir de los cultivares más preferidos.

Riesgo es el producto de la exposición y del peligro. Para nuevos caracteres, exposición es la frecuencia de escape de un gen y el peligro es el impacto de este evento. Nosotros dudamos que la transferencia de resistencia a nematodos a solanáceas silvestres crearía un peligro. Por cierto, como las papas silvestres son una fuente de genes valiosa y no son malezas económicamente importantes, cualquier transferencia de genes que incrementara su adaptación debería ser considerado deseable. Sin embargo, nosotros buscamos reducir la exposición. Medimos la dispersión

del polen de una planta macho-fértil a otra planta macho-estéril de *S. tuberosum* ssp. *andigena* en Bolivia. Para este fin se contó el número de frutos formados en las plantas macho-estériles a una determinada distancia de las plantas que producían polen (macho-fértiles). El estudio proporcionó información preliminar de la exposición sin necesidad de utilizar plantas transgénicas. Los resultados indican que el riesgo relativo fue reducido de aproximadamente el 10% de polinización cruzada ocurrida en plantas ubicadas a un metro de distancia a 0.001% en plantas ubicadas a 100 metros de distancia de las plantas con polen. En la actualidad estamos examinando si la exposición varía considerablemente con las localidades en Bolivia dependiendo de la actividad de los insectos, tales como las abejas. Nuestra meta será el reducir el riesgo de transferencia por varios medios que reduzcan la magnitud de este nivel cuantificable. El riesgo relativo de cruzamientos inter-específicos con otras solanáceas puede predecirse de ser menor que el indicado por cuatro razones. Las plantas andro-estériles son altamente receptivas de polen; los cruzamientos inter-específicos generalmente muestran una reducida fertilidad en relación a cruzamientos intra-específicos; las especies silvestres de *Solanum* se encuentran a menores densidades que un cultivo de papa; y las especies silvestres se encuentran normalmente a distancias mucho mayores.

### **Efectos en otros organismos**

Estudios a la fecha se han concentrado sobre las consecuencias de expresión de la cistatina en tejidos verdes. Esto significa estudios básicos que involucran el escenario más pesimista. Por otro lado, si no se pueden percibir riesgos mensurables con estas plantas, además la expresión específica en las raíces disminuirá este riesgo a niveles muy bajos. Las papas a ser sembradas en el campo poseerán una expresión restringida a las raíces para de esta forma reducir los efectos colaterales sobre otros organismos herbívoros. Una segunda ventaja de trabajar primero con insectos presentes en el follaje es que existen múltiples técnicas que han sido diseñadas para este fin.

Se ha diseñado un planteamiento jerárquico para identificar los insectos que se encontrarían bajo riesgo. En primer lugar fue llevado a cabo un muestreo para identificar los insectos más comunes asociados al cultivo de la papa. Luego estos fueron evaluados usando una prueba histoquímica para determinar la actividad de la proteasa de la cisteína para identificar aquellos potencialmente bajo riesgo por la expresión de las cistatinas en las plantas de papa. De estos insectos, los cicadélidos (langostas) y collémbolas expresaron proteasas cisteínicas en sus sistemas digestivos. En adición se examinaron áfidos, porque trabajos previos habían sugerido que estos fueron afectados por la ingestión de cistatinas a pesar de que estos carecen de proteasas digestivas cisteínicas. Los áfidos fueron afectados cuando las cistatinas fueron adicionadas a su dieta pero no cuando ellos se alimentaron de plantas que expresaban la misma cistatina. La carencia de eficacia de una cistatina fue confirmada al estudiar el impacto de esas plantas en un segundo homóptero, la langosta *Eupteryx*

*aurata*. El crecimiento de la langosta fue similar en las plantas transgénicas y en los controles.

Estos resultados obtenidos en el laboratorio crearon la expectativa que ni los áfidos o las langostas serían afectados bajo condiciones de campo. Los resultados de campo demostraron que este era el caso. Las dos líneas de plantas GM más efectivas contra un NQP (*G. pallida*) no tuvieron efecto sobre el número acumulativo de ambos insectos monitoreados en un campo en el Reino Unido. Los resultados indican que la expresión específica en el tejido es importante en los efectos de los inhibidores de proteasas sobre diferentes invertebrados. Los niveles de expresión en el sistema radical de 0.4% de la proteína soluble total fueron suficientes para proporcionar un control de los nematodos, pero las concentraciones en el tejido vascular fueron insuficientes para reproducir los efectos adversos que se observaron en los áfidos con los ensayos con dietas artificiales. En el futuro se usarán promotores específicos para la raíz que reducirán aun más el riesgo para los insectos del follaje, independientemente del tipo de tejido de la planta que ellos consuman. Esto asegurará que los insectos benéficos que se alimentan de estos insectos no serán amenazados por esta técnica molecular.

El siguiente paso de este trabajo será el estudiar los insectos que se alimenten de raíces que expresen las cistatinas. El collémbola *Folsomia candida* será usado para este estudio porque es ampliamente utilizado para ensayos ecotoxicológicos. Este insecto consume hojas y raíces y así la expresión de una concentración limitada de cistatina en las raíces podrá ser estudiada. Trabajos adicionales sobre otra gama de organismos va desde gusanos de tierra a mesofauna y micro-organismos de suelo.

La mayoría de los trabajos básicos están siendo completados en el Reino Unido para identificar los estudios críticos que deberán ser implementados en Bolivia. Este trabajo será completado en Bolivia y su evaluación se efectuará sin ninguna consecuencia ambiental que se juzgue contraria a los beneficios esperados. Finalmente la decisión sobre la liberación posterior de los cultivos transgénicos dependerá únicamente de las autoridades nacionales competentes de Bolivia.

## **Consecuencias ambientales de su liberación masiva en la agricultura**

Bolivia no exporta papas y produce cultivos que no son adecuados para este fin. Por lo tanto el mercado interno de papas define el hectareaje nacional. La meta inicial de las plantas GM resistentes a nematodos no es producir más papas, sin embargo, esto será necesario en los años venideros de acuerdo a cómo la población incrementa, sino el reducir el área anual destinada al cultivo. El principal cambio ambiental sería un incremento en la producción de otros cultivos en tierras o áreas ya cultivadas. Esto promovería una mejor nutrición para los indígenas e incrementaría la biodiversidad varietal entre especies en sus campos.

La resistencia a nematodos también proporcionaría otros beneficios. Actualmente ocurre la destrucción de bosques nativos en Bolivia con la finalidad de obtener terrenos libres de nematodos (NQP, *N. aberrans*, *Meloidogyne* ssp.) para producir semilla de papa. Reduciendo el problema de nematodos se reduciría la necesidad de esta actividad. Cualquier nuevo procedimiento agrícola podría presentar consecuencias inesperadas, sin embargo los éxitos alcanzados por los cambios genéticos efectuados por el mejoramiento convencional de plantas cultivadas es excelente. Nosotros esperamos identificar y minimizar cualquier impacto negativo que las plantas GM resistentes a nematodos pudieran tener con la colaboración de socio-economías durante todos los estados de desarrollo y adopción de una forma apropiada de esta tecnología.

### **Explotación por compañías biotecnológicas**

Muchos juzgan que la no participación en la generación de cultivos GM de las compañías biotecnológicas es un tema clave para el mundo en desarrollo (4). Una importante esperanza para el futuro es que estas compañías sean estimuladas a donar esta tecnología. Sus intereses no están comprometidos con cultivos o países que no están dentro de sus planes de comercialización. Muchos activistas en contra de los cultivos GM expresan su preocupación por los monopolios internacionales. Ellos fallan ya sea por una carencia de información o sesgan al valorar una compañía independiente, financiada con fondos públicos que está bien establecida.

La investigación con fondos públicos y de ayuda puede contribuir a resolver las necesidades del mundo en desarrollo (1) y es necesario el fortalecimiento de las capacidades en los cultivos GM de los Centros del Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (GCIAl). La Fundación Rockefeller es una organización de ayuda que ya ha invertido considerables recursos para el desarrollo de cultivos GM de dominio público, particularmente el arroz. En la investigación con recursos públicos un tema clave es la disponibilidad de caracteres ventajosos en el dominio público. La tecnología de resistencia a nematodos de la Universidad de Leeds proporciona un paradigma: Ha sido donada para su aplicación en los países en vías de desarrollo por medio de una licencia libre de derechos otorgada al Programa de Investigación en Ciencias de Plantas (PSP) del Departamento para el Desarrollo Internacional (DFID) del gobierno del Reino Unido. Varios cultivos y muchos países en vías de desarrollo están comprendidos bajo este programa. Los costos para el desarrollo de esta tecnología para los agricultores pobres es reducida por una inversión paralela dirigida a las necesidades mundiales primarias. Los fondos públicos se pueden concentrar en temas específicos relacionados a la adopción segura y efectiva de cultivos GM en el mundo en desarrollo.

## **Comentarios Finales**

Ambos, aquellos a favor o en contra de esta tecnología, deben juzgar cada oportunidad por sus propios méritos. En este caso de la resistencia a nematodos de la papa, el beneficio para Bolivia es el compromiso de reducir la superficie destinada al cultivo de papa cada año, e incrementar la producción de cultivos alimenticios más nutritivos para los pobres en la tierra actualmente disponible, permitiendo conservar y utilizar su biodiversidad, sin ampliar sus fronteras agrícolas. Beneficios adicionales para la economía rural en términos de una mejor nutrición, una mayor producción y de mejores oportunidades de empleo serían considerables, reduciendo las actuales migraciones del campo hacia las ciudades. Al contrario de muchas otras tecnologías, ésta no requerirá costos mayores o extras (las papas transgénicas resistentes serán del dominio público y no se cargarán derechos adicionales) y no demandará cambios en las prácticas agrícolas del cultivo. Una preocupación particular, si el desarrollo agrícola no es estimulado y apoyado, es que la pobreza pueda guiar a algunos agricultores hacia otros posibles cultivos más rentables, como el de la coca. Sería una hipocresía el no ayudar a los Bolivianos mientras se les condena por producir un cultivo tradicional que en el Norte, pero no los Bolivianos, lo usan equivocadamente. Este es un aspecto de la interdependencia entre el Norte y el Sur que nosotros ignoramos a costa de nuestra sociedad.

La preocupación real es que muchos países en desarrollo requieren apoyo de la comunidad científica internacional para garantizar una efectiva y segura adopción de los cultivos GM. Una adopción informal o sin considerar completamente los temas de bioseguridad de cultivos GM debe evitarse. La investigación financiada con fondos públicos en el mundo en desarrollo debería tomar un interés y participación activa en apoyar una adopción responsable de los cultivos GM en el mundo en desarrollo. Cada combinación de un cultivo y un transgen requiere un profundo análisis de sus potencialidades en beneficio de los pobres. Si esto puede llevarse a cabo y los temas de bioseguridad son considerados plenamente, los cultivos GM tienen un potencial considerable para ayudar a proporcionar una seguridad alimentaria a las poblaciones del mundo que están creciendo rápidamente.

## **Agradecimiento**

Esta investigación fue financiada a través del Programa de Investigación de Ciencias de Plantas, del Departamento para el Desarrollo Internacional (DFID) del Reino Unido, en beneficio de los países en desarrollo. Los puntos de vista expresados no son necesariamente los del DFID.

### Referencias Bibliográficas

1. Atkinson, H.J. 1998. The Robin Hood approach to plant biotechnology. *Science & Public Affairs* Winter 1998, 27-29.
2. Atkinson, H.J., J. Franco, J. A. González. 1999. A novel basis for pest management of *Globodera* spp. on potato in the Central Andes. Final Report. EU contract TS3\* CT94 0274. 81 pp.
3. Barnett, A. 1999. Vatican Theologians say "prudent yes" to GM foods. *Guardian* November 28th. Article 0,4273,3936025,00.
4. Butler, D., T. Reichhardt. 1999. Long term effect of GM crops serves up food for thought. *Nature* 398, 651 -656.
5. Caligari, P.D.S. 1992. Breeding new varieties. In: Harris, P.M. (ed.). *The Potato Crop: The Scientific Basis for Improvement*. London (UK). Chapman and Hall, London. pp. 334-372.
6. Dyson, T. 1996. Population and food. Global trends and future prospects. Routledge, London, and New York.
7. Franco, J., J. Ramos, R. Oros, G. Main, N. Ortuño. 1998/1999. Pérdidas Económicas Causadas por *Nacobbus aberrans* y *Globodera* spp. en el Cultivo de la Papa en Bolivia. *Revista Latinoamericana de la Papa* 11, 40-66.
8. Hawkes, J.G. 1992. Biosystematics of the Potato pp. 13-64. In: *The Potato Crop: The Scientific Basis for Improvement* Ed. Harris, P. Chapman and Hall, London, 909 pp.
9. Masuelli, R.W., E.L. Camadro. 1997. Crossability relationships among wild potato species with different ploides and Endosperm Balance Number. *Euphytica* 94, 227-235.
10. Quiroga, J. 1995. Production and marketing of potatoes in Bolivia. Instituto Boliviano de Tecnología Agropecuaria. Working Document 2.
11. Raybould, A.F., R.T. Clarke. 1999. Defining and measuring gene flow pp. 41-88. In: *Gene Flow and Agriculture: Relevance to Transgenic Crops*. British Crop Protection Council for CPS Symposium Proceedings Monograph N° 72. Edited Lutman. P.J.W. BCBC, Farnham, UK. 286 p.
12. Spooner, D.M., R. Castillo. 1997. Re-examination of series relationships of South American wild potatoes (Solanaceae: *Solanum* sect Pelota): Evidence from chloroplast DNA restriction site variation. *American Journal of Botany* 84, 671-685.
13. Terrazas, F., V. Suarez, G. Watson, G. Thiele, T. Walker, A. Devaux. 1995. Diagnosing potato yields in farmers's fields in Bolivia. *PROINPA Reports*.

14. United Nations. 1999. World Population 1998. United Nations Population División, Department of Economic and Social Affairs (ST/ESA/SER.A/176).
15. van Lindert, P., O. Verkoren. 1994. *Bolivia, a Guide to its People, Politics and Culture*. Latin America Bureau, London (ISBN O 906156 91 2) 75pp.
16. Veerman, E.C.I., P.A.M. van den Keybus, A. Vissink, A.V.N. Amerongen. 1996. Human glandular salivas: Their separate collection and analysis. *European Journal of Oral Sciences* 104, 346-352.
17. Zeballos, H. 1997. Aspectos económicos de la producción de papa en Bolivia. Informe al Centro Internacional de la Papa (CIP) y el Programa de Investigación de la Papa (PROINPA). 209pp.