

## **Vulnerabilidad y opciones de adaptación del cultivo papa (*Solanum tuberosum* L.) al cambio climático para condiciones de altiplano y valles de Bolivia**

*Vulnerability and adaptation options of potato crop (*Solanum tuberosum* L.) to the climate change for conditions of Altiplano and Valleys of Bolivia*

Juan Carlos Torrico Albino<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Investigador principal del Instituto Agrario Bolivia

\* Autor de contacto: Av. Kantutani 900. La Paz - Bolivia. E-mail: torrico@web.de

### **RESUMEN**

El cambio climático está afectando todo el sistema ecológico y socio-económico del planeta. Los sistemas agrícolas son altamente dependientes de factores climáticos lo que los hace altamente vulnerables a sus cambios. El cultivo de la papa es estratégico para la seguridad alimentaria en Bolivia. Los escenarios climáticos indican que se vivirán con más frecuencia cambios extremos y cambios en el comportamiento normal, mismos que podrían repercutir de forma diferente sobre el cultivo de papa. Los objetivos de este estudio fueron: i) generar escenarios climáticos hasta el año 2030; ii) construir escenarios basados en datos reales de suelo, clima y cultivo, y iii) cuantificar el efecto del cambio climático sobre el cultivo de papa en la región de los Valles y Altiplano. Se usó, calibró y validó el modelo "Sistema de Soporte para Toma de Decisiones en la Transferencia de Agrotecnología" (DSSAT) para condiciones locales y del cultivo papa Sani Imilla. Los resultados mostraron que existirá un aumento de la temperatura y la precipitación en ambas regiones. El cultivo de la papa es vulnerable a cambios en parámetros climáticos. Los rendimientos se elevan hasta 4,6% por cada 10 años, adicionalmente podría incrementarse hasta 6.6% si se dobla la concentración de CO<sub>2</sub> a 660 ppm. La medida de adaptación más eficiente es el riego, aplicaciones de 60 mm a 180 mm incrementarían el rendimiento entre 30% a 60%. El modelo mostró poca sensibilidad a las distintas fechas de siembra. Si bien los rendimientos aumentan, éstos pueden disminuir y llegar al 2030 con una baja en los rendimientos de hasta 48% a consecuencia de la baja compensación de agua por efecto de la mayor evapotranspiración. En conclusión, según el modelo, se elevarán las temperaturas en la región del altiplano y valles, y se pueden lograr mayores rendimientos si se combina este aumento de temperatura con riego. Estos resultados pueden servir para dirigir programas de asistencia técnica y toma de decisiones en la planificación agropecuaria.

**Palabras clave:** Bolivia, cultivo de papa, adaptación al cambio climático, DSSAT, Modelos climáticos.

### **ABSTRACT**

Climate change is affecting the entire ecological and socio-economic system of the planet. Agricultural systems are highly dependent on climatic factors which makes them highly vulnerable to their changes. The cultivation of potatoes is strategic for the food security in Bolivia. The climatic scenarios indicate that extreme changes and changes in the normal behavior will be experienced more frequently, which could have a different impact on the potato crop. The objectives of this study were: i) to generate climate scenarios up to the year 2030; ii) build scenarios based on real data of soil, climate and crop; and iii) quantify the effect of climate change on potato cultivation in the Valles and Altiplano

region of Bolivia. The model “ Decision Support System for Agrotechnology Transfer” (DSSAT) was used, calibrated and validated for local conditions and the potato crop Sani imilla. The results showed that there will be an increase in temperature and precipitation in both regions. Potato cultivation is very sensitive to changes in climatic parameters. The yields rise up to 4.6% for every 10 years, additionally it could increase up to 6.6% if the CO<sub>2</sub> concentration is doubled till 660 ppm. The most efficient adaptation measure is irrigation, applications from 60 mm to 180 mm would increase the yield between 30% to 60%. The model showed little sensitivity to the different sowing dates. Although yields increase, they can decrease and reach 2030 with a drop in yields of up to 48% as a result of the low water compensation due to the higher evapotranspiration. In conclusion, on the basis of the model, temperatures will rise in the Altiplano and Valles, and higher yields can be achieved if this increase in temperature is combined with irrigation. These results can be used to direct technical assistance and decision-making programs in agricultural planning.

**Keywords:** Bolivia, potato crop, adaptation to climate change, DSSAT, Climate models.

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 La papa en Bolivia

El cultivo de papa ha sido catalogado como uno de los cuatro cultivos más importantes del mundo (Villa, 2015; FAOSTAT, 2015; Seminario, 2018), en Bolivia es en cultivo más importante desde el punto de vista socio-económico y de la seguridad alimentaria. Este alimento aporta aproximadamente el 50% del consumo de energía (FAO, 2018; Torrigo, 2014; Gabriel et al, 2014; Saavedra, 2014), además, es la mayor fuente de ingresos en regiones de altura. (Alwang et al., 2013)

Este cultivo es también importante porque se cultiva a gran escala en 7 de los 9 departamentos del país (Figura 1), abarcando 182.675 ha (INE, 2013). El 28% de los campesinos del país son productores de papa, generando cerca de 134.000 fuentes de empleo directo y 200.000 fuentes indirectas. La papa ha representado en los últimos 25 años cerca al 20% de los 12 cultivos principales del país (INE, 2018; Torrigo, 2014). Históricamente tiene una permanencia importante en la economía nacional, representando actualmente el 23% de los productos agrícolas del país. El consumo per cápita en las regiones de valles y altiplano es de 108 kg (El Deber, 2017), el promedio nacional ronda los 92 kg/año. (FAO, 2018)

En Bolivia, la papa es típicamente cultivada en pequeñas superficies en las zonas altas e interandinas (Thiele et al. 2008). La variedad más cultivada es la Sani imilla (Saavedra, 2014), esta variedad es cultivada una sola vez al año (a secano). La agricultura a secano representa en Bo-

livia más del 91 por ciento del total de la superficie agrícola (Bolivia, 2013; INE, 2013). Las siembras se inician en octubre-noviembre y su ciclo dura aproximadamente 180 días; la rotación típica comprende papa-Phaseolus vulgaris L. o, papa-Zea mays L. (Bottner et al., 2006). Los rendimientos promedio de papa son en promedio de 6 t ha<sup>-1</sup> (Zeballos et al. 2009, INE, 2013). Las causas para los bajos rendimientos son principalmente el déficit hídrico y carencia de agua de riego, suelos con baja fertilidad, semilla de baja calidad y genética de bajo potencial de rendimiento, baja mecanización, presencia de plagas, enfermedades, heladas, granizos y sequías frecuentes. (Condori, 2017; Gabriel et al. 2011)

### 1.2 Escenarios climáticos para Bolivia

Los fenómenos naturales tienen una incidencia negativa en el desarrollo y estabilidad social, económica y sobre los sistemas naturales. Cambios en su comportamiento se convierte en una seria amenaza. Actualmente, la manifestación de fenómenos principalmente hidroclimáticos extremos están agravando la vulnerabilidad de los sistemas naturales y productivos. (Sanjinés, 2011)

En 1992 el IPCC publicó la primera familia de escenarios que consideraba variables sociales y económicas, llamados IS92. Los escenarios mayormente utilizados hoy en día son publicados por el IPCC en 2007, 2014b, 2018 en el paquete SRES (special reduction emissions scenarios). Son escenarios que modelan las emisiones futuras en base a distintos patrones de desarrollo social, económico, político, tecnológico, etc. El escenario A2, es el escena-

rio más pesimista, contempla una población creciente y un desarrollo económico regionalizado, mientras que el escenario B2, más optimista, contempla un menor crecimiento poblacional y un desarrollo económico moderado. Bajo A2 se espera que la concentración de dióxido de carbono para 2100 sea de unos 850 ppm (partes por millón) mientras que bajo B2 se estima que la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera será de unos 600ppm.

Los escenarios climáticos analizados para el país, reflejan situaciones de cambio en los patrones normales del clima, sobre todo en regiones como el altiplano, que se verá afectado por elevaciones de la temperatura y variaciones en los patrones de precipitación. (Pinto y Renee, 2013)

La población afectada por eventos climáticos adversos en los últimos cuarenta años corresponde a un 69% por sequías, 28% por inundaciones y 3% por deslizamientos. (Quiroga et al., 2010)

### **1.3 El cambio climático en Bolivia y sus impactos sobre la agricultura**

Observaciones de datos climáticos reales, de más de 50 años, de las estaciones de Toralapa y Choquenaira, muestran una tendencia real de incremento de las temperaturas promedio y las precipitaciones. Algunos otros métodos de estimación, que no son de medición superficial, muestran lo contrario (Andersen, 2014), sin embargo, la mayoría de los estudios y modelos coinciden con los datos reales, tendencias estimadas y proyectadas. (Andrade, 2008; Pinto y Renee, 2013; Zaratti, 2013). El altiplano boliviano, como todos los ecosistemas terrestres, está sometida a cambios globales tales como el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico, cambio de uso de suelo y cambios en patrones demográficos. (Saugier, 2006)

Los reportes del IPCC (1992, 1997, 2000, 2011, 2014 a y b, 2018), corroborados por PNCC (2007), Bolivia (2013), IAB (2018), Hoegh-Guldberg, et al. (2018) afirman que en Bolivia es una evidencia el cambio climático, esto es ratificado por los agricultores, que afirman que en las últimas décadas son considerables las pérdidas de las cosechas por efecto del cambio climático expresado en redistribución desfavorable de lluvias y mayor incidencia de eventos climáticos extremos.

Los impactos del cambio climático son multidimensionales y afectan a todos los sectores en general. La agricultura es extremadamente vulnerable al cambio

climático y éste fenómeno afecta al sector agropecuario principalmente por: i) mayor incidencia de heladas; ii) mayor incidencia de granizadas, iii) cambios en la temperatura, iv) por cambios en la distribución e intensidad de la precipitación, v) por cambios en la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire. (Torricon, 2015; Gabriel, 2016). En Bolivia se prevé que el aumento de las temperaturas disminuya el rendimiento de los cultivos y promueva la proliferación de malezas y plagas. Se prevé la mayor incidencia de heladas que en las regiones altas disminuya la producción de alimentos y bajen considerablemente los ingresos familiares. Es probable que, como consecuencia de la modificación de los regímenes de lluvias, se pierdan cosechas y disminuya la producción a largo plazo de los principales cultivos. (Torricon, 2015)

Los reportes calculan que alrededor de 1.5 a 4.5 °C será el aumento de la temperatura, esto repercutirá de diferente forma sobre los cultivos, existirá una mayor evapotranspiración, menos humedad del suelo, se salinizará la capa freática. El aumento de la temperatura global con la correspondiente elevación de la concentración del CO<sub>2</sub> tendrá efectos sobre la fisiología de los cultivos, suprimiendo la fotorrespiración y en consecuencia se incrementará la eficiencia hídrica. Así mismo la fotosíntesis se acelerará en un 30 a 100% y las C<sub>3</sub> y C<sub>4</sub> crecen más y más rápidamente (IPCC, 1997; 2014b). Los niveles de evaporación se incrementarán a razón de 5% por cada grado centígrado de aumento, esto implicara desertificación de suelos (IPCC, 1997 y 2018). Así mismo, este efecto será diferente para las diferentes regiones altitudinales, siendo diferentes los efectos para regiones bajas que para las altas.

Las regiones productoras de papa, sobre los 3000 msnm con precipitaciones entre 300-670 mm son especialmente vulnerables (Muñoz Reyes 1977, Hanagarth 1987), las familias del altiplano y valle alto llegan al 66% de extrema pobreza, los cultivos presentan bajos índices de productividad debido a los altos grados de erosión, pendientes altas, bajo manejo de materia orgánica y nutrientes (Bottner et al., 2006). Estas características se agravan aún más en un contexto de clima cambiante, mala distribución de precipitaciones, mayor incidencia de heladas, granizadas y plagas (Torricon, 2015; Lal et al., 2011, Arcos, 2015; Chumacero, 2006). Los efectos adversos del cambio climático para la producción agrícola han tornado a esta actividad más vulnerable a factores exógenos,

incrementando el riesgo a la estabilidad de la oferta de estos productos, así como del consumo de subsistencia de los productores agrícolas y de la seguridad alimentaria de la población en general (Nogales, 2014). Otras limitantes como el escaso capital de inversión, escasez de mano de obra, baja disponibilidad de tecnologías, los precios bajos en el mercado impiden el desarrollo de una agricultura competitiva y sostenible (Torrice, 2015; Gonzales, 1994; Gabriel, 2016; Pinto y Renee, 2013). En general, los costos por causas climáticas en Bolivia superan los 2100 millones (Sanjinés y Nardó 2011, INE, 2010)

#### **1.4 Adaptación del sector agrícola al cambio climático**

Los impactos del cambio climático afectarán fuertemente el proceso de desarrollo del país, poniendo en riesgo los sistemas de vida en las diferentes regiones (IPCC, 2000; Pinto y Renee, 2013). El impacto de eventos climáticos extremos en la agricultura y la ganadería, provocará reducción de ingresos de los productores, así como efectos sobre su dinámica socio-económica, comportamiento de los alimentos en los mercados y sobre la sostenibilidad. (ICC, 2015; Pinto y Renee, 2013).

Las urgencias dirigidas hacia medidas de adaptación se centran en el recurso agua, alimentos, energía, liderazgo-gobernanza y educación ambiental (Zaratzki, et al. (2013). Además, debe invertirse más en incrementar la resiliencia de los sistemas naturales y productivos, incrementando las capacidades de absorción, adaptación, y transformación. (Torrice, et al. 2017)

En un escenario de cambio climático, la adaptación hacia la resiliencia es fundamental para reducir la vulnerabilidad de la producción agrícola y apuntar al desarrollo de los medios de vida sostenibles. La mejora de las capacidades, el desarrollo de tecnologías y las políticas de fortalecimiento al sector productivo son fundamentales para buscar alternativas para la adaptación de los cultivos al cambio climático. (Gabriel, 2016; Torrice, 2017)

La CCS (1996), FAO (2017), recomiendan medidas de adaptación de cultivos con cambios en las fechas de siembra y cosecha, cambios en el sistema de cultivo, aplicación de riego adicional, manejo de la agro-biodiversidad, medidas políticas, legislación, entre otras. El INIA (1997) e IPCC (2014b) afirman que los resultados de simulación son una herramienta fundamental para el estu-

dio de Cambios Climáticos, y el IBSNAT (1994); DSSAT, (2018) ha producido el modelo más completo para la simulación del crecimiento de cultivos, el Modelo "Sistema de Soporte para la toma de decisiones en la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT)" integra submodelos y variables de suelo, clima, genotipo y labores culturales, convirtiéndose en una herramienta bastante útil para el estudio del impacto del cambio climático sobre la agricultura. (Raymundo, 2014; Abdrabbo et al., 2010; Štastná, 2010).

#### **1.5 Objetivos**

El objetivo general fue determinar la vulnerabilidad y las opciones de adaptación del cultivo de papa al posible cambio climático en las estaciones experimentales de Choquenaira para la región altiplánica de La Paz y Toralapa en el Valle alto de Cochabamba.

Para cumplir con el objetivo general se utilizó modelos de simulación para el crecimiento de cultivos y para la estimación del clima global; a través de éstos se cumplió con los siguientes objetivos específicos:

- Construir diferentes escenarios para clima en base a datos histórico, suelo, genotipo y cultivo, calibrar y validar el modelo DSSAT para las condiciones de Choquenaira y Toralapa.
- Realizar un análisis de sensibilidad del modelo para la papa, duplicando la concentración de CO<sub>2</sub>,  $\pm 2,4$  °C de temperatura y  $\pm 5, 10$  y 15% de la precipitación.
- Analizar y evaluar las opciones de adaptación para el cultivo de papa al posible cambio climático.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 Ubicación y Características agroecológicas de las regiones estudiadas**

El presente estudio se realizó para zonas comprendidas en la región andina (Estación experimental Choquenaira, La Paz) y de los valles (Estación experimental Toralapa, Cochabamba) (Figura 1).

Las características agroecológicas y clima varían poco en ambas regiones, los datos promedio de temperatura, precipitación, horas sol y altitud se detallan en la Tabla 1.

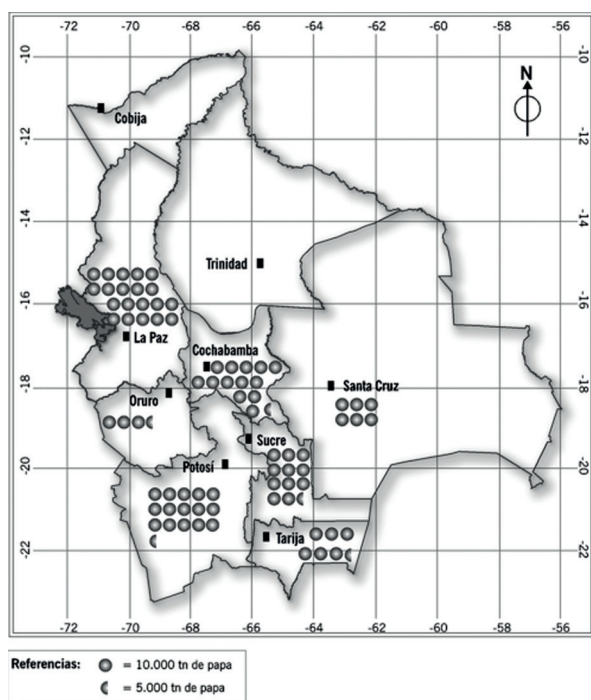


FIGURA 1. Zonas productoras de papa en Bolivia (Zeballos, 2009)

TABLA 1: Promedio de indicadores climáticos y altitud para las estaciones climáticas de El Belén, Viacha y Toralapa.

Región – Estación climática	T° max (°C)	T° min (°C)	PP (mm)	Horas sol (hr)	Altitud (msnm)
Altiplano – El Belén	15,2	-1	562	7,85	3820
Altiplano – Viacha	16,8	-0,5	582	7.8	3800
Valle - Toralapa	15	8	599	8	3430

## 2.2. El modelo “Decision Support System for Agrotechnology Transfer” – DSSAT y submodelos

Griffin (1993), IBSNAT (1994) y DSSAT (2018) describen al modelo “Sistema de Apoyo a la Decisión para la Transferencia Agrotecnológica (DSSAT)” como un programa de aplicación de software que comprende modelos de simulación de cultivos, así como herramientas para facilitar el uso efectivo de los modelos. Las herramientas incluyen programas de gestión de bases de datos para suelo, clima, manejo de cultivos y datos experimentales, utilidades y programas de aplicación. Los modelos de simulación de cultivos simulan el crecimiento, el desarro-

llo y el rendimiento en función de la dinámica del suelo, planta y la atmósfera.

Los sub modelos incluidos son MAGICC que trabaja con temperaturas promedio locales y las relaciona con los Gases de Efecto Invernadero. El Modelo HadCM3 relaciona los datos de clima local con los datos de los Modelos de Circulación Global. SCENGEN genera escenarios climáticos.

SUBSTOR-Papa simula la dinámica diaria del agua, el nitrógeno, la biomasa, la fenología y la acumulación del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*). Los modelos de dinámica del agua y del suelo del suelo utilizados en el SUBSTOR-Papa son del tipo de capacidad. El modelo reconoce cinco etapas de desarrollo (pre-siembra, elongación de brotes, emergencia, iniciación de tubérculos y madurez). Cinco parámetros específicos del genotipo controlan el crecimiento de la planta y los procesos de desarrollo, como la expansión del área foliar, la iniciación del tubérculo, la tasa de crecimiento potencial del tubérculo y el cese del crecimiento del tubérculo. Se aplican diversas funciones de temperatura relativa (con valores que van de 0 a 1 para cada temperatura cardinal - base, óptima y máxima) para modificar el crecimiento de la hoja, la raíz y el tubérculo, la fotosíntesis y la iniciación del tubérculo.

El crecimiento y desarrollo de la papa se simulan en función de la acumulación y la partición de la biomasa en relación con la radiación interceptada, la fotoperiodicidad y la temperatura. El crecimiento de los tubérculos está controlado por la tasa de crecimiento potencial de los tubérculos y el agua del suelo y el balance de N. El balance hídrico del suelo comprende la infiltración por precipitación / riego, drenaje profundo, flujo no saturado, evaporación del suelo y procesos de transpiración de la planta. La transpiración de la planta se define por la evapotranspiración potencial, la distribución de la raíz de la planta y el agua disponible de la planta en el suelo, calculada como la diferencia entre la capacidad del campo y los valores del punto de marchitamiento. El balance de nitrógeno del suelo consiste en varios procesos de N como la mineralización, la inmovilización, la nitrificación, la desnitrificación, la amonificación y la absorción de N de la planta, que a su vez se define por la demanda del cultivo y el suministro de suelo.

### 2.3. Procedimiento experimental

La metodología que se empleó fue la recomendada por el IBSNAT (1994) y DSSAT (2017) (Diseñadores del modelo "Decision Support Sistem for Agrotechnology Transfer" - DSSAT), para la utilización de modelos de simulación, la metodología empleada tuvo sus particularidades debido a la poca disponibilidad de datos (Figura 2).

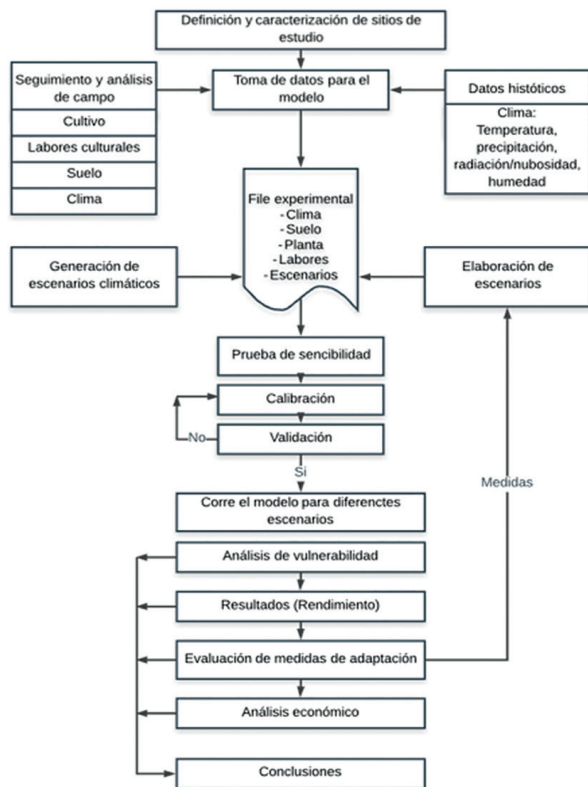


FIGURA 2: Flujograma de la metodología

Se identificaron las zonas y lugares de experimentación en función de la disponibilidad y generación de datos, además de su cobertura en las zonas productoras de papa del país. Se recopiló la información de archivos históricos sobre la producción de papa y a la vez se realizó el seguimiento a los cultivos experimentales de ambas estaciones experimentales. Estos datos fueron de clima, suelo, genotipo, labores culturales. Mediante la utilización de modelos de simulación del clima global y en base a datos de clima históricos se generaron diferentes escenarios climáticos.

A través del seguimiento y la simulación con los escenarios reales hasta 2010 se procedió a la calibración de

factores del modelo y del cultivo adecuándose a la realidad nacional. Posteriormente se realizó la validación del modelo y el análisis de sensibilidad para los factores climáticos de temperatura, precipitación y radiación. Una vez calibrado y validado el modelo se procedió al análisis de vulnerabilidad midiendo la reacción del cultivo a los diferentes escenarios climáticos, para concentraciones normales y dobladas de CO<sub>2</sub> a 660 ppm. La corrida del modelo tuvo lugar para los años 2010, 2020 y 2030, para ambas regiones de estudio.

Finalmente se evaluaron las medidas de adaptación recomendadas, sobre adición de agua por medio de riego, anticipación y postergación de las fechas de siembra y cosecha. Para finalmente en base a todos estos resultados sacar las conclusiones.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Calibración

El proceso de calibración del modelo se realizó paralelamente al seguimiento del cultivo de papa en las parcelas de producción de la Estación Experimental de Choque-naira del departamento de La Paz, región correspondiente al altiplano.

Genotipo: Parámetros ajustados para la variedad sani imilla: i) Tasa de expansión de la hoja (cm<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>): 1600; ii) Tasa de crecimiento del tubérculo (g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>): 27; iii) Temperatura crítica °C: 21; iv) Sencibilidad al fotoperiodo: 0,6.

Distribución estacional del tiempo: El modelo DSSAT acepta el tiempo en un rango de 1 a 365 días de enero a diciembre respectivamente. El cultivo de la papa en nuestro medio se desarrolla en el último trimestre del año y su fase final en el primer trimestre del siguiente año (generalmente de octubre a marzo del siguiente año). Este problema fue superado tomando al mes de julio como el primer mes del año y así quepan dos semestres de dos años consecutivos en un solo año.

Asimilación de nitrógeno: El factor de asimilación del nitrógeno se encuentra a una escala de 0 a 1 correspondiendo el valor de 1 a una completa asimilación de nitrógeno, se calibró a un valor de 0.4 para las condiciones de estudio.

Drenaje: Debido a las propiedades físicas del suelo en el perfil (textura franco arenosa) se calibró la percolación

del agua, tomando como verdadero el que se presenta sobre la capa "C". Se calibró la profundidad de 30 a 145 cm.

### 3.2. Validación

Luego de calibrados los factores referidos al cultivo y al modelo se procedió a verificar el comportamiento del modelo, para este efecto se tomaron datos de la Estación Experimental de Toralapa-Cochabamba. Sobre los escenarios construidos de suelo, clima y genotipo se procedió al incremento de fertilizantes en las siguientes dosis de nitrógeno 00,00 kg ha<sup>-1</sup>; 40,00 kg ha<sup>-1</sup>; 80,00 kg ha<sup>-1</sup>; 120,00 kg ha<sup>-1</sup>.

Se compararon 16 parcelas con datos observados en un total de 112 simulaciones, Las mediciones de los cultivos se realizaron al día 127, 134, 158, 163 después de la germinación. Los datos de la regresión lineal se presentan en la Tabla 2.

**TABLA 2:** Parámetro de la Regresión Entre el Rendimiento Observado y Simulado

Parámetros	Valor/ Ecuación
Ecuación de la regresión	$Y = 1.0005X + 0,1908$
Coefficiente de determinación (R <sup>2</sup> )	0.8392
Coefficiente de correlación (r)	0.916
Desvío estándar de la regresión (S)	2.01
Rendimiento promedio (ton ha <sup>-1</sup> )	21

**NOTA.** Los resultados obtenidos en la regresión nos muestran un rango de confianza del modelo de un 91,6% con un error de estimación de más/menos 2 ton ha<sup>-1</sup>.

### 3.3. Escenarios climáticos

Los modelos de Circulación Global dividen a Bolivia en 5 cuadrantes, en los cuales se los puede agrupar según región climática (Anexo 3). Las características generales tomadas en cuenta por los modelos IS92-a, IS92-c, A2 y B2 se encuentran descritas en los Anexos 1 y 2.

Las variables temperatura media, temperatura mínima media, temperatura máxima media y precipitación media a nivel mensual fueron analizadas para el periodo 1970-2000. Los resultados muestran un incremento de temperatura, tanto media como mínima y máxima, en las regiones de Altiplano y valles para todos los escenarios.

Mientras el incremento en temperaturas medias, mínimas y máximas es del orden de 3°C para el escenario B2,

ese incremento está entre 3.5°C y 5°C para el escenario A2. Los mayores incrementos de la temperatura media corresponden al Altiplano. La precipitación promedio disminuye moderadamente en la zona altiplánica (hasta un 20%) y Valles. El modelo climático asume baja resolución espacial (Anexo 2 y 3).

**TABLA 3:** Resultados de las simulaciones de clima para el 2010, 2020, 2030, 2050 y 2100

Año	Variación de Temperatura °C		Variación de Precipitación %		Variación de Nubosidad %	
	O <sup>(0)</sup>	P <sup>(0)</sup>	O <sup>(0)</sup>	P <sup>(0)</sup>	O <sup>(0)</sup>	P <sup>(0)</sup>
2010	0.6	0.6	3	2.7	-0.3	-0.3
2020	0.9	0.8	4.3	3.7	-0.4	-0.3
2030	1.2	1.1	5.7	4.7	-0.5	-0.4
2050	1.9	1.4	8.6	6.4	-0.8	-0.6
2100	3.4	1.8	15.8	8.5	-1.5	-0.8

**NOTA:** Escenario "O" optimista: A2 y IS92-a y pesimista "P": B2 y IS92-c

### 3.4. Análisis de sensibilidad

El incremento de temperatura tiene efecto favorable en el rendimiento, los mayores efectos ocurren cuando la temperatura mínima de eleva.

La variación de la precipitación entre -20% a +20% (en relación a la precipitación normal) no produce cambios significativos en los rendimientos. Fuera de este rango -20% y +20% los rendimientos varían drásticamente.

La disminución en la precipitación entre 50% y 60%, sumado al estrés hídrico normal, promedio ambas regiones de aproximadamente 180 mm, provoca una pérdida casi total del cultivo. En cambio, el incremento de la precipitación en un 50% a 60% es altamente favorable.

El incremento de la temperatura es más significativo que la variación de la precipitación hasta los tres grados centígrados, a partir de este punto es necesario un aumento en la precipitación para incrementar los rendimientos, al incrementar la temperatura la evapotranspiración aumenta en un 5 a 10% por grado centígrado.

El máximo rendimiento se observó para un incremento de temperatura de 3°C y la PP en un 50% obteniéndose 58% de incremento en el rendimiento.

Se observó puntos críticos en los cuales el rendimiento cae bruscamente, estos ocurren cuando la temperatura

tiene un valor de -3°C y se reduce en 20% la precipitación; la otra caída se presenta a +3°C con -20% en la precipitación, y finalmente a -3°C y +50% en la precipitación.

### 3.5. Análisis de vulnerabilidad

El incremento promedio en el rendimiento por cada diez años es de 4.6% para la zona de Choquenaira y de 1.7% para la zona de Toralapa. Estos incrementos son debidos exclusivamente al Cambio Climático.

Duplicando la concentración de CO<sub>2</sub> de 330 ppm a 660 ppm (como se espera según los escenarios), los rendimientos suben a razón de 6.6% por cada diez años, 2% más para el altiplano en general. Para los valles este incremento es en promedio de 10.1% por cada diez años y un 4.8% más que sin doblamiento de concentración de CO<sub>2</sub>. Lo que significa que en los valles solo a causa del doblamiento del CO<sub>2</sub> los rendimientos suben en 4.8% y en el altiplano 6.8%.

Se ha determinado que el promedio de incremento después del año 2020 es mayor en la zona del altiplano que en los valles (aproximadamente en un 3%).

El cambio climático afecta en mayor proporción a la papa en el altiplano que en los valles; cualquier aumento en la temperatura provoca una aceleración en la intensidad de la fotosíntesis, al no estar está limitada por otros factores. La media de temperatura del altiplano se encuentra a 10°C por debajo del óptimo para el cultivo de la papa, en los valles 5°C por debajo de la óptima, por esta razón un incremento de la temperatura provoca una mayor reacción en el altiplano que en los valles. Borah (1959), Bodlaender (1963), Menzel, (1985) and Streck, et al. (2007) indican que la emergencia se produce dos semanas antes a 22 °C que a 13 °C. El alargamiento de los tallos es óptimo a 18 °C, lento a 9 °C y nulo a 6 °C. Para la producción de hojas entre 12 y 14 °C. Productores bolivianos, de las regiones estudiadas, indican un óptimo para el desarrollo del cultivo entre 14 y 18 °C.

El incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> tiene un efecto positivo en el rendimiento cuando esta va acompañada con la elevación de la temperatura, es evidente que a mayor temperatura la actividad enzimática se acelera con el consecuente incremento en la asimilación de CO<sub>2</sub>. Esta tasa incremento en el rendimiento es más marcada en los valles que en el altiplano. Lo que nos indica que en los valles los rendimientos empezaran a disminuir después del

año 2040 aproximadamente si se siguen con las mismas prácticas de cultivo, hallazgo corroborado por Saugier (2006) y Denning (1995). Además, la fertilización de CO<sub>2</sub> tendría un efecto positivo en todas las áreas, pero más para cultivos C3, y menos para cultivos C4. Para 2100 se espera aumentos en rendimientos por fertilización de CO<sub>2</sub> de 20-27% en el escenario A2 y de 12-18% en el escenario B2.

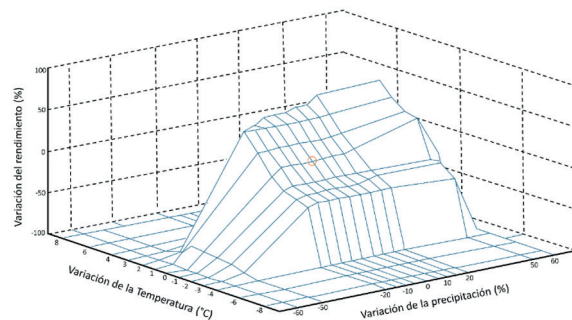


FIGURA 3: Variación del rendimiento en función de la temperatura y precipitación

### 3.6 Adaptación

Las medidas evaluadas fueron cambios en las fechas de siembra, aplicación de riego adicional, utilización de otras variedades y sustitución por otros cultivos.

#### Cambios en las fechas de siembra

Los incrementos en el rendimiento no son significativos al anticipar o postergar la siembra en 25 días, bajo ninguno de los escenarios climáticos, siendo su máximo valor un aumento del 1.2% para el escenario 2020 (Tabla 4).

Aumento o disminución de 60 días en la fecha de siembra provocan bajas en el rendimiento hasta llegar a cero, debido a la falta de agua y la ocurrencia de heladas. Asimismo, se determinó que con la aplicación de riego adicional se puede adelantar las fechas de siembra.

#### Aplicación adicional de agua

Se ha determinado a través de la modelización que para un aumento del 50% en la precipitación para la fase de inicio de la tuberización hasta poco antes de la maduración el rendimiento se incrementa entre el 30% y 60% para los dos escenarios y para las dos regiones estudiadas. Dándose el máximo aumento para el escenario 2030, Abdrabbo (2010) en Egipto y Sun (2008) para China encontraron similar respuesta del cultivo de papa bajo los mis-



mos escenarios climáticos. En Inglaterra Daccache (2011) determine que el rendimiento de papa puede subir entre 3 y 6 % bajo el escenario B1. Holden (2003) por el contrario halló en Irlanda que los rendimientos de papa podrían reducirse a consecuencia de la baja compensación hídrica.

La mayor o menor carencia de agua es difícil identificar comparando las dos zonas de estudio, si bien, existe mayor precipitación en los valles, esta agua está menos tiempo disponible para las plantas. Según el modelo de simulación la tasa de evapotranspiración es mayor en los valles debido a la mayor temperatura; esta pérdida de agua no se ve compensada en su totalidad con la mayor precipitación en comparación con el Altiplano. Desde este punto de vista su necesidad de riego es mayor. En cambio, en el Altiplano, la necesidad de agua es debido a las bajas precipitaciones que no satisfacen los requerimientos del cultivo.

**TABLA 4:** Análisis de adaptación anticipando y postergando fecha de siembra del cultivo de papa para diferentes escenarios en Toralapa y Choquenaira

(1) La fecha de siembra de referencia para ambas regiones es entre el 15/10 y 25/10.

Incremento en la fecha de siembra <sup>(1)</sup>	Escenario climático 1 y 2	Incremento del rendimiento (%) Toralapa	Incremento del rendimiento (%) Choquenaira
25 días antes	2010	0.4	0.3
	2020	1.2	0.4
	2030	1.3	0.4
-25 días después	2010	0.15	0.2
	2020	1.2	0.6
	2030	1.1	0.6

#### 4. CONCLUSIONES

- El cultivo de papa Sani imilla, bajo condiciones de Altiplano y Valles de Bolivia, es altamente vulnerable a cambios en el clima, expresando alteraciones en su desarrollo vegetativo y en los rendimientos. Esta vulnerabilidad es algo más acentuada en el Altiplano que en los Valles.
- El análisis de datos históricos de más de 30 años de las estaciones meteorológicas de El Belén, Viacha y Toralapa y sus tendencias coinciden con los Modelos de Circulación Global (A2, B2, IS92a y IS92c). Estos indican que la temperatura media y las precipitaciones

tienen a aumentar; la concentración de CO<sub>2</sub> tiende a subir y podría llegar a duplicarse. La nubosidad tiende a reducirse. La incidencia de heladas podría retrasarse, y los granizos podrían ser más frecuentes.

- La modelación del cultivo de papa (nivel de confianza del 93%), bajo las condiciones de cambio climático, para el genotipo Sani imilla, regiones altiplano y valles, periodos 2010, 2020 y 2030, nos indica que: i) El cambio climático podría ser positivo bajo condiciones específicas de manejo. El aumento de temperatura y concentración de CO<sub>2</sub> favorecen la actividad fotosintética del cultivo, asimilación de biomasa, e incremento del rendimiento (hasta 58%), sin embargo, la condicionante es la compensación hídrica a través del riego, pues se esperan incrementos en la tasa de evapotranspiración; ii) Sin una compensación hídrica (50-180 mm) y manejo adecuado de la fertilidad (principalmente N y MO), el rendimiento del cultivo de papa podría disminuir drásticamente.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- Abdrabbo, M. A. A., Khalil, A. A., Hassanien, M. K. K., & Abou-Hadid, A. F. (2010). Sensitivity of potato yield to climate change. *J Appl Sci Res*, 6(6), 751-755.
- Alwang, J., G. W. Norton, V. Barrera, and R. Botello. (2013). Conservation agriculture in the Andean highlands: Promise and precautions. *In: Mann, S. (ed). The Future of Mountain Agriculture*. New York: Springer-Verlag, 21-38.
- Andersen, Lykke E., & Verner, Dorte. (2014). Social Impacts of Climate Change in Bolivia: A municipal level analysis of the effects of recent climate change on life expectancy, consumption, poverty and inequality. *Revista Latinoamericana de Desarrollo Económico*, (22), 49-83. Recuperado de: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2074-47062014000200003&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2074-47062014000200003&lng=es&tlng=en).
- Andrade, Marcos. (2008). Mitos y verdades acerca del cambio climático en Bolivia. *Revista Boliviana de Física*, 14(14), 42-49. Recuperado de: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1562-38232008000100003&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232008000100003&lng=es&tlng=en).
- Arcos, Jesús, & Zúñiga, Doris. (2015). Efecto de rizobacterias en el control de *Rhizoctonia solani* en el cultivo de papa. *Ecología Aplicada*, 14(2), 95-101. Recuperado

- de: [http://www.scielo.org/pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1726-22162015000200002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org/pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162015000200002&lng=es&tlng=es).
- Bodlaender, K. B. A. (1963). *Influence of temperature, radiation and photoperiod on development and yield* (No. 227). [sn].
- Bolivia. (2013). *Plan del Sector Desarrollo Agropecuario 2014-2018 "Hacia el 2025"*. La Paz, Bolivia: Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT).
- Borah, M. N. (1959). *The effect of light intensity, length of day and temperature on growth and tuber formation in the potato* (Doctoral dissertation, University of Nottingham).
- Bottner, P., M. Pansu, L. Samiento, D. Herve, R. Callisaya-Bautista, and K. Metselaar. (2006). Factors controlling decomposition of soil organic matter in fallow systems of the high tropical Andes: A field simulation approach using <sup>14</sup>C-and <sup>15</sup>N-labelled plant material. *Soil Biol. Biogeochem.* 38: 2162-2177.
- CCS. (1996). *Para Comprender el Cambio Climático: Guía Elemental de la Convención de las Naciones Unidas*. Recuperado de: <http://www.mctic.gov.br/portal>
- Chumacero Moscoso, Claudia, & Camacho Marquez, Magda Cristina. (2006). Evolución del sistema de aynua durante una década en cuatro comunidades del Altiplano boliviano. *Ecología en Bolivia*, 41(3), 19-39. Recuperado de: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1605-25282006001200004&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282006001200004&lng=es&tlng=es).
- Condori-Mamani, Pastor, Loza-Murguía, Manuel Gregorio, Sainz-Mendoza, Humberto Nelson, Guzmán-Calla, Jorge, Mamani-Pati, Francisco, Marza-Mamani, Félix, & Gutiérrez-González, Diego Eddy. (2017). Evaluación del efecto del biol sobre catorce accesiones de papa nativa (*Solanum ssp.*) en la estación experimental kallutaca. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 5(1), 15-28. Recuperado de: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2308-38592017000100003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2308-38592017000100003&lng=es&tlng=es).
- Daccache, A., Weatherhead, E. K., Stalham, M. A., & Knox, J. W. (2011). Impacts of climate change on irrigated potato production in a humid climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1641-1653.
- Denning, A. S., I. Y. Fung & D. Randall. (1995). Latitudinal gradient of atmospheric CO<sub>2</sub> due to seasonal exchange with land biota. *Nature* 376, 240-243.
- DSSAT. (2018). *Decision Support System for Agrotechnology Transfer*. Recuperado de <https://dssat.net>
- El Deber. (2017). Bolivia con déficit comercial de \$us 52,5 millones en 10 años de producción de papa. *El Deber*. Recuperado de: <https://www.eldeber.com.bo/economia/Bolivia-con-deficit-comercial-de-us-525-millones-en-10-anos-de-produccion-de-papa-20170515-0076.html>
- FAO. (2017). *World agriculture: towards 2015/2030: an FAO study*. Routledge. Recuperado de: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781351536356>
- FAO. (2018). *Agricultores del altiplano paceño fortalecen capacidades para la producción de semillas de papa de alta calidad*. Recuperado de: <http://www.fao.org/bolivia/noticias/detail-events/en/c/1109388/>
- FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2015. Database- DSSAT. (2018). *International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer*. Agricultural Production. Retrieved from: Retrieved from: <http://apps.fao.org>.
- Gabriel J. (2011). *Documento marco: Estrategias y perspectivas del mejoramiento genético de papa (Solanum tuberosum L.) en Bolivia*. Cochabamba, Bolivia: Fundación PROINPA, 60.
- Gabriel, Julio, Botello, Rubén, Casazola, José Luis, Vera, Ricardo, Rodríguez, Félix, & Angulo, Ada. (2014). Revalorización de las papas nativas de Bolivia (*Solanum tuberosum L.*) como fuente de hierro y zinc. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 5(1), 3-12. Recuperado de: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2072-92942014000100002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942014000100002&lng=es&tlng=es).
- Gabriel, J. (2016). Reflexiones sobre los efectos del cambio climático en la agricultura de Bolivia. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 7(2), 112-113. Recuperado de: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2072-92942016000200009&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942016000200009&lng=es&tlng=es).
- Griffin, T.S., Johnson, B.S., Ritchie, J.T., (1993). A simulation model of potato growth and development: SUBSTOR-Potato Version 2.0. IBSNAT Research Report series 02. Dept. of Agronomy and Soil Science, Univ. of Hawaii.
- Gonzales de Olarte, E. (1994). En las fronteras del mer-

- cado: Economía política del campesinado en el Perú. Instituto de Estudios Peruanos, Lima. 339 p.
- Hanagarth, W. (1989b). Ecology and riskspreading in the small- holding agriculture of the semiarid puna in Bolivia. *Plant Res. and Devpt.* 30, 76-103.
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., & Guiot, K. (2018). Impacts of 1.5 °C global warming on natural and human systems.
- Holden, N. M., Brereton, A. J., Fealy, R., & Sweeney, J. (2003). Possible change in Irish climate and its impact on barley and potato yields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 116(3-4), 181-196.
- IAB. (2018). Instituto Agrario Bolivia. *Revista Análisis*, 1(2018), 82. Recuperado de: <https://www.institutoagrario.org/analisis>
- IBSNAT. (1994). *International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer*. DSSAT Version 3. Recuperado de: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4899-3665-3\\_25](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4899-3665-3_25)
- IPCC. (1992). *Climate change 1992: The supplementary report to the IPCC scientific assessment*.
- IPCC. (1997). *Posible Cambio Climático y Análisis de Mitigación de Efecto de Invernadero*. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/region-sp.pdf>
- IPCC (2000). *IPCC special report on land use, land-use change, and forestry*.
- IPCC (2007). The physical science basis. *Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 996.
- IPCC. (2011). *IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation*.
- IPCC (2014a). *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio climático (IPCC). 5º informe de evaluación (AR5), impactos del cambio climático, vulnerabilidad y adaptación*. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- IPCC. (2014b). *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- IPCC. (2015). *Climate change 2014: mitigation of climate change* (Vol. 3). Cambridge University Press. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
- IPCC. (2018). Impacts of 1.5 °C global warming on natural and human systems. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- INIA. (1997). Uso de Modelos de Simulación en la Evaluación de Sistemas Productivos Sustentables. Recuperado de: <http://www.uneo.ch>
- INE. (2010). Estadísticas económicas y productivas. Recuperado de: <https://www.ine.gob.bo>
- INE. (2013). Instituto Nacional de Estadística Bolivia. Estadísticas agropecuarias. Consultado el: 08 de marzo 2019. Recuperado de: <https://www.ine.gob.bo>
- Lal, R., J. A. Delgado, P. M. Groffman, N. Millar, C. Dell, and A. Rotz. (2011). Management to mitigate and adapt to climate change. *J. Soil Water Conservation* 66, 276-285.
- Menzel, C. M. (1985). Tuberization in potato at high temperatures: interaction between temperature and irradiance. *Annals of Botany*, 55(1), 35-39.
- Montes de Oca, I. (1997). *Geografía y recursos naturales de Bolivia*. Edobol, La Paz, Bolivia.
- Muñoz Reyes, J. (1977). Geografía de Bolivia. 2da. Ed. Academia Nacional de Ciencias de Bolivia, Artes Gráficas Don Bosco, Editorial Educacional del Ministerio de Educación y Cultura, La Paz. 515 p.
- Nogales Carvajal, Ricardo, & Córdova Olivera, Pamela. (2014). Seguros agrícolas basados en índices climáticos: un estudio de caso en Bolivia. *Investigación & Desarrollo*, 1(14), 5-21. Recuperado de: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2518-44312014000100002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2518-44312014000100002&lng=es&tlng=es).
- Pinto R., María Reneé. (2013). Vulnerabilidad de los medios de vida ante el cambio climático en Bolivia. *Tinkazos*, 16(34), 174-177. Recuperado de: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1990-74512013000200013&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1990-74512013000200013&lng=es&tlng=es)
- PNCC. (1997). Programa Nacional de Cambios Climáticos. El cambio climático y sus Implicaciones en Bolivia. Recuperado de: <https://www.orasconhu.org/sites/default/files/Avances%20GACCS%20EI%20Cambio%20Climatico%20Caso%20Boliviano%20-%20MAparicio.pdf>
- Quiroga, Roger; Torrico, G.; Salamanca, L. A.; Quiroga, R. y Espinoza, J. C. (2010). *Atlas de amenazas, vulnerabilidades y riesgos de Bolivia*. Oxfam, Fundepco, VI-

- DECICODI, Bolivia.
- Raymundo, R., Kleinwechter, U., & Asseng, S. (2014). Virtual potato crop modeling: A comparison of genetic coefficients of the DSSAT-SUBSTOR potato model with breeding goals for developing countries.
- Saugier, B., & Pontailier, J.Y. (2006). El ciclo global del carbono y sus consecuencias en la fotosíntesis en el Altiplano boliviano. *Ecología en Bolivia*, 41(3), 71-85. Recuperado de: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1605-25282006001200006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282006001200006&lng=es&tlng=es).
- Saavedra, Ana K., Delgado, Jorge A., Botello, Ruben, Mamani, Pablo, & Alwang, Jeffrey. (2014). A new N index to assess nitrogen dynamics in potato (*Solanum tuberosum* L.) production systems of Bolivia. *Agrociencia*, 48(7), 667-678. Recuperado de: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952014000700001&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952014000700001&lng=es&tlng=en).
- Sanjines Tudela, Gimmy Nardó. (2011). Amenazas ambientales y vulnerabilidad en un contexto de variabilidad climática en Bolivia. *Revista Latinoamericana de Desarrollo Económico*, (16), 81-130. Recuperado de: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2074-47062011000200006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2074-47062011000200006&lng=es&tlng=es).
- Seminario-Cunya, Juan F., Villanueva-Guevara, Roiser, & Valdez-Yopla, Misael H.. (2018). Rendimiento de cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) amarillos precoces del grupo Phureja. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 639-653. Recuperado de: <https://dx.doi.org/10.15517/ma.v29i3.32623>
- Streck, N. A., de Paula, F. L. M., Bisognin, D. A., Heldwein, A. B., & Dellai, J. (2007). Simulating the development of field grown potato (*Solanum tuberosum* L.). *Agricultural and Forest Meteorology*, 142(1), 1-11.
- Sun, F., Lin, E. D., Li, J. P., & Xiong, W. (2008). Study on adaptation measures of potato production by using DSSAT crop model. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2.
- Štastná, M., Toman, F., & Dufková, J. (2010). Usage of SUBSTOR model in potato yield prediction. *Agricultural water management*, 97(2), 286-290.
- Thiele G, Hareau G, Suarez V, Chujoy E, Bonierbale M, Maldonado L. (2008). Varietal change in potatoes in developing countries and the contribution of the International Potato Center (IPC): 1972-2007.
- Torrigo, J.C. (2014). *Desarrollo Rural y Agroalimentario en Bolivia: Procesos, Problemática y Perspectivas*. Ed.: epubli GmbH. ISBN-10: 3737522081
- Torrigo-Albino, J.C. (2015). *Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, la producción agropecuaria y la seguridad alimentaria en Bolivia: Riesgo climático, adaptación y mitigación para la seguridad alimentaria*. La Paz: IPDRS - Interaprendizaje. Campo virtual por la tierra y el desarrollo rural. 39pp
- Torrigo-Albino, J.C., Peralta-Rivero, C., y Petellier, Elise. (2017). Evaluation of resilience capacity of agroforestry production systems, agriculture under irrigation and semi-intensive livestock. *CienciAgro* 1(2017), 37-48.
- Villa, Pedro Manuel, Sarmiento, Lina, Rada, Fermín José, Machado, Daniel, & Rodrigues, Alice Cristina. (2017). Leaf area index of potato (*Solanum tuberosum* L.) crop under three nitrogen fertilization treatments. *Agronomía Colombiana*, 35(2), 171-175. Recuperado de: <https://dx.doi.org/10.15446/agron.colomb.v35n2.62110>
- Zaratti, Francesco. (2013). Hoffmann, Dirk y Requena, Cecilia. (2012) Bolivia en un mundo 4 grados más caliente. Escenarios sociopolíticos ante el cambio climático para los años 2030 y 2060 en el altiplano norte. *Tinkazos*, 16(33), 192-193. Recuperado en 07 de marzo de 2019, de [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1990-74512013000100012&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1990-74512013000100012&lng=es&tlng=es).
- Zeballos H, Balderrama F, Condori B, Blajos J. (2008). *Economía de la papa en Bolivia (1998-2007)*. Cochabamba, Bolivia: Fundación PROINPA, 129.
- Zeballos, Hernan & Balderrama, Felipe & Condori, Bruno & Blajos, Jorge. (2009). *La Economía de la Papa en Bolivia*.

## ANEXOS

### Anexo 1: Características generales tomadas en cuenta por el modelo de IS92-a y el IS92-c

Escenario	Población al año 2100	Descripción Crecimiento económico	Fuente de energía
IS92-c	Proyectada por las Naciones Unidas el año 90" 6.4 billones	1990- 2025: 2.0 %	8.000 EJ Petróleo convencional.
		1990-2100: 1.0 %	7.300 EJ Gagas natural costo de energía nuclear decrece anualmente en 0.4%
IS92-a	Proyectada por el banco mundial el 91" 11.3 billones	1990- 2025: 2.9%	12.000 EJ petróleo convencional.
		1990-2100: 2.3%	13.000 EJ gas natural costo de energía solar disminuye a US 0.075/kWh.

### Anexo 2: Escenarios de Emisiones SRES del IPCC

Escenario	Descripción
A2	El escenario A2 describe un mundo muy heterogéneo basado en la preservación de las identidades locales. Los patrones de fertilidad de las regiones convergen lentamente, lo que se traduce en un aumento de población constante. El desarrollo económico está orientado regionalmente, y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico están más fragmentados que en A1.
B2	El escenario B2 describe un planeta donde el énfasis se pone en las soluciones locales dirigidas hacia la sostenibilidad social, económica y ambiental. Es un mundo con una población creciente, pero a tasas más lentas que en los otros escenarios, con niveles de desarrollo económico intermedios, y un cambio tecno-lógico lento pero variado. La sociedad está orientada hacia la protección ambiental y la equidad social, y prioriza los ámbitos local y regional.

### Anexo 3: Ubicación Geográfica de las Regiones en Bolivia

Región	Región	Longitud (°oeste)	Latitud (°sur)
I	Tropical	70-65	15-10
II	Altiplano Norte Central y Valles	70-65	20-15
III	Altiplano Sur	70-65	25-20
IV	Llanos	65-60	20-15
V	Chaqueña	65-60	25-20

### Anexo 4: Relación de los escenarios climáticos con el año al que corresponden

Momentos para los escenarios 1 y 2	Año para el cual ha sido generado
Base de datos	Corresponde a los años 70-80, 90, 91, 95, 97, 99, 2000.
Momento I	Generado para el año 2010
Momento II	Generado para el año 2020
Momento III	Generado para el año 2030

Anexo 5: Matriz de análisis de sensibilidad y vulnerabilidad del cultivo de papa al cambio climático en función de temperatura y precipitación.

		Incremento de la Precipitación													
		-60	-50	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	50	60	
Incremento de la temperatura	-8	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	
	-6	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	
	-4	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	
	-3	-100.00	-95.30	-31.20	-29.20	-29.20	-29.20	-29.20	-29.20	-29.20	-29.20	-28.00	-56.20	-100.00	
	-2	-100.00	-90.05	-28.35	-24.35	-24.31	-24.31	-24.31	-24.31	-24.31	-24.31	-20.30	-18.54	-20.00	-95.00
	-1	-100.00	-85.55	-22.49	-18.28	-18.28	-18.28	-18.28	-18.28	-18.28	-18.28	-18.28	-18.28	-18.28	-85.00
	0	-100.00	-80.01	-8.50	-0.66	-0.66	-0.66	0.00	0.00	0.65	0.85	4.50	25.60	-20.00	
	1	-100.00	-80.54	13.80	14.40	15.40	15.40	15.96	15.96	14.28	16.00	18.20	29.45	0.00	
	2	-100.00	-95.35	31.98	33.19	33.19	33.19	34.14	34.14	34.49	34.49	35.02	41.74	5.64	
	3	-100.00	-100.00	-85.20	25.60	32.00	38.60	40.10	40.10	44.59	44.59	55.00	58.32	16.58	
	4	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-50.00	-40.00	-30.00	-30.00	-10.00	15.00	40.00	20.00	
	6	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-80.00	-50.00	-80.00	-70.00	10.00	0.00	10.00	
	8	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	0.00	-10.00	0.00	

Para fines de cálculo se tomó como óptimo los factores que intervienen en el cultivo dejando solamente las variables de clima para el análisis de sensibilidad correspondiente. Para este caso los rendimientos potenciales de papa en Choquenaira es 28.5 ton ha<sup>-1</sup> y en Toralapa el rendimiento potencial simulado luego de la validación y calibración es 27.3 ton ha<sup>-1</sup>.