La economía del

cambio climático en Bolivia

Impactos en el sector agropecuario

Banco Interamericano de Desarrollo

La economía del cambio climático en Bolivia

Impactos en el sector agropecuario

Autores: Lykke E. Andersen, Luis Carlos Jemio y Horacio Valencia

Editores: Carlos E. Ludeña y Leonardo Sánchez Aragón

Naciones Unidas

CEPAL

BID

Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo

Andersen, Lykke E.
La economía del cambio climático en Bolivia: impactos en el sector agropecuario / Lykke E. Andersen, Luis Carlos Jemio, Horacio Valencia; Carlos E. Ludeña, Leonardo Sánchez Aragón, editores.
p. cm. – (Monografía del BID; 191)
Incluye referencias bibliográficas.
1. Agriculture—Economic aspects—Bolivia. 2. Agriculture—Climatic factors—Bolivia. I. Jemio M., Luis Carlos. II. Valencia, Horacio. III. Ludeña, Carlos E., editor. IV. Sánchez Aragón, Leonardo, editor. V. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático y Sostenibilidad. VI. Título. VII. Serie.
IDB-MG-191
Número de referencia de la CEPAL, Naciones Unidas: LC/L.3811

Palabras clave: Cambio Climático, Agricultura, Bolivia
Clasificación JEL: Q54, Q11, Q15, O54.

Este documento es uno de los análisis sectoriales que conforman la serie "La economía del cambio climático en Bolivia" del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en el marco del Estudio Regional de la Economía del Cambio Climático (ERECC) en América Latina y el Caribe, coordinado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y con el apoyo de UKAID del gobierno Británico.

Se agradece el apoyo del Ministerio de Ambiente y Agua en la realización de este estudio, en especial al Programa Nacional de Cambios Climáticos, ahora Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra.

Esta serie fue coordinada por Carlos Ludeña en colaboración con Leonardo Sánchez-Aragón (BID) y Carlos de Miguel, Karina Martínez y Mauricio Pereira (CEPAL).

El presente documento fue preparado por Lykke E. Andersen, Luis Carlos Jemio y Horacio Valencia, con los aportes de Juan Carlos Ledezma, Carlos Ludeña, Consuelo Luna, Graciela Magrin, Rubén Mamani, Gustavo Nagy, Alejandra Palma, Ana Ríos, Patricia Valdez y Jaime Villanueva.

Citar como:
Andersen, L.E., L.C. Jemio, H. Valencia. 2014. *La economía del cambio climático en Bolivia: Impactos en el sector Agropecuario*. C.E. Ludeña y L. Sanchez-Aragon (eds), Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 191, Washington, DC.

Las opiniones expresadas en esta publicación son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.

Se prohíbe el uso comercial no autorizado de los documentos del Banco, y tal podría castigarse de conformidad con las políticas del Banco y/o las legislaciones aplicables.

Copyright ©2014 Banco Interamericano de Desarrollo. Todos los derechos reservados; este documento puede reproducirse libremente para fines no comerciales.

1. INTRODUCCIÓN 1

2. LA METODOLOGÍA APLICADA PARA ESTIMAR LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO 2

3. LAS RELACIONES EMPÍRICAS ENTRE EL CLIMA Y EL DESEMPEÑO DEL SECTOR AGROPECUARIO 6

3.1. Clima e ingresos rurales 6
3.2. Clima y selección de cultivos 8
3.3. El efecto de fertilización de CO_2 11

4. UN ESCENARIO BASE PARA EL SECTOR AGROPECUARIO EN BOLIVIA HASTA 2100 19

4.1. La situación actual del sector agropecuario en Bolivia 19
4.2. Proyecciones de población 21
4.3. Proyecciones de empleo 22
4.4. Proyecciones de PIB agropecuario 22
4.5. Proyecciones de área deforestada y área cultivada 23
4.6. Valor agregado por trabajador 25

5. SIMULACIÓN DE IMPACTOS DIRECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL SECTOR AGROPECUARIO 26

5.1. Simulación de los efectos brutos iniciales del cambio climático 26
5.2. Simulación de los efectos netos considerando la posibilidad de sustitución de cultivos 30
5.3. Inclusión de los impactos de cambios en biodiversidad 34
5.4. Inclusión de los impactos de cambios en la disponibilidad de agua para riego 35

6. SIMULACIÓN DE IMPACTOS TOTALES (DIRECTOS, INDIRECTOS Y DINÁMICOS) DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL SECTOR AGROPECUARIO 37

6.1. La trayectoria de impactos directos 37
6.2. Introducción de shocks en el modelo de equilibrio general computable 39
6.3. Impactos totales del cambio climático sobre el sector agropecuario 42

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 44

8. REFERENCIAS 46

9. ANEXO A: ESTIMACIÓN DE BENEFICIOS POR SUSTITUCIÓN DE CULTIVOS 49

Resumen

El cambio climático que ocurriría durante el siglo XXI va a afectar al sector agropecuario en Bolivia en muchas diferentes maneras. En el presente estudio analizamos no solo los efectos brutos iniciales del cambio climático sobre los rendimientos agrícolas, sino también los efectos netos permitiendo que ocurra una adaptación espontánea a través de la sustitución de cultivos. Adicionalmente, incluimos el efecto de la fertilización de CO_2, el efecto de aumentos en la frecuencia de eventos extremos, el efecto de cambios en el nivel de biodiversidad y servicios eco-sistémicos que sostienen el sector, y el efecto de cambios en la disponibilidad de agua para riego. Finalmente, además de estos efectos directos estimamos los efectos indirectos y dinámicos usando un modelo de equilibrio general computable que realiza simulaciones hasta el año 2100.

De acuerdo a nuestros cálculos, el valor presente neto de los efectos totales sumarian un total de pérdidas de 106 mil millones de dólares durante el período 2010-2100, lo que corresponde a una pérdida promedio de 16% del valor neto presente del PIB sectorial o de 2,1% del valor neto presente del PIB total durante el periodo 2010-2100.

La economía del cambio climático en Bolivia

Impactos en el sector agropecuario

1. Introducción

Uno de los sectores más directamente afectados por el cambio climático es el sector agropecuario, cuya producción depende fuertemente de las oscilaciones del clima. Es un sector muy importante en Bolivia ya que contribuye con el 9% del PIB, ocupa cerca de 34% de la población ocupada[1], y es determinante para la seguridad alimentaria.

El objetivo del presente estudio es cuantificar los posibles efectos del cambio climático sobre el sector agropecuario en Bolivia desde el año 2000 hasta el año 2100. El cambio climático que se analiza es el previsto por el modelo PRECIS (basado en el Modelo de Circulación General, HadCM3) en los escenarios A2 (extremo) y B2 (más moderado) entre el periodo base (1961-1990) y futuro (2071-2100).

El sector agropecuario en Bolivia es muy heterogéneo: cubre diferentes climas y sistemas de producción, lo que complica el análisis e invalida generalizaciones. Adicional a estas diferencias en el clima actual entre las diferentes regiones del país, se sumaría el hecho que los cambios climáticos esperados no serían los mismos para todo el país. Adicionalmente hay que tomar en cuenta que durante el horizonte de 100 años de la presente investigación se esperaría grandes cambios estructurales en el sector. Por eso, previo al análisis de los impactos del cambio climático, es necesario establecer un escenario base que nos muestra cuantas personas estarían trabajando en agricultura, la extensión de tierra cultivada y los rendimientos que se puede esperar bajo las condiciones climáticas observadas durante el periodo base. Dentro de este escenario base es necesario establecer la evolución de los ingresos promedios, las exportaciones agropecuarias, y otros variables sobre los cuales deseamos medir los impactos.

El documento está estructurado de la siguiente manera. Una vez explicada la metodología de estimación de impactos del cambio climático en la sección 2, la sección 3 procede a establecer relaciones empíricas entre el clima y el desempeño del sector agropecuario. La sección 4 desarrolla el escenario base para el sector durante el resto del siglo bajo el supuesto contra-factual que el clima se mantendría igual que en el periodo de referencia (1961-1990). La sección 5 simula seis diferentes tipos de impactos sobre el sector agropecuario: i) el efecto bruto inicial, lo cual supone que los agricultores siguen cultivando los mismos cultivos aunque el clima está cambiando, ii) el efecto neto que toma en cuenta que los agricultores pueden substituir la producción actual por cultivos más apropiados para el nuevo clima, iii) el efecto de fertilización de CO_2, iv) el efecto de eventos climáticos extremos (inundaciones), v) el efecto de cambios en biodiversidad y los servicios eco-sistémicos que sostiene el sector agropecuario, y vi) el efecto de cambios en la disponibilidad de agua para riego. La sección 6 introduce todos los efectos directos del cambio climático en un modelo de equilibrio general computable para poder estimar también los efectos indirectos y dinámicos que surgen a partir de estos efectos directos. La Sección 7 discute las implicaciones para la seguridad alimentaria y, finalmente, la sección 8 proporciona conclusiones y recomendaciones.

[1] Datos de INE para el año 2000.

2. La metodología aplicada para estimar los impactos del cambio climático

Estudios anteriores sobre el impacto del cambio climático en el sector agropecuario de Bolivia tienden a caer en dos categorías: 1) Modelos específicos que usan modelos de crecimiento para cultivos específicos (por ejemplo, Vizcarra (2009) para el caso de arroz) para ver cómo el crecimiento de estos cultivos se podrían ver afectados por cambios en temperatura, precipitación y concentración de CO_2, y 2) modelos globales que tratan a todo Bolivia como un lugar homogéneo (por ejemplo Parry et al., 2004 y Cline, 2007).

Los estudios de cultivos específicos son muy detallados, ya que usan datos diarios para alimentar a los modelos. Son adecuados para sugerir maneras específicas de adaptarse a cambios climáticos ya ocurridos, ya que pueden identificar la restricción más crítica para un cultivo específico en un lugar específico. Por ejemplo, estos modelos pueden recomendar: cambio en la fecha de siembra; introducción de riego; cambio a otra variedad más apropiada; o cambio a otro cultivo más apropiado. Sin embargo, para la evaluación de impactos cien años en el futuro, estos modelos no son tan útiles porque no contamos con el nivel de detalle sobre los insumos que estos modelos requieren.

El trabajo de Parry et al. (2004) integra modelos de crecimiento de cultivos, modelos de cambio climático y modelos socio-económicos de equilibrio general en una manera conceptualmente muy completa. El análisis está hecho para el mundo entero, pero con resultados diferenciados para cada país. El modelo usa el mismo modelo climático global que el presente estudio, HadCM3, por lo cual sus resultados son comparables con los del presente estudio. Presenta resultados con y sin el efecto de fertilización de CO_2. Para el caso de Bolivia, para el escenario A2, en un plazo de 100 años, Parry et al. (2004) encuentran un cambio en rendimientos de los cultivos de -10 a -30% si no se toma en cuenta la fertilización de CO_2, y de 0 a 2,5% cuando se toma en cuenta la fertilización de CO_2.

El principal problema con este estudio, desde el punto de vista del análisis de los impactos del cambio climático en Bolivia, es que trata a toda Bolivia como una sola observación.

La metodología aplicada en el presente estudio se acerca a la de Parry et al. (2004), en el sentido que combina modelos de crecimiento de cultivos con un modelo de cambio climático y un modelo socio-económico de equilibrio general. Sin embargo, las simulaciones se hacen a nivel municipal para poder captar la heterogeneidad geo-física y social de Bolivia, y además se incluye los impactos de cambios en la frecuencia de desastres (sobre todo inundaciones), cambios en el ecosistema que sostiene las actividades agropecuarias y cambios en la disponibilidad de agua para riego.

La metodología sigue los diez pasos para la estimación de los impactos del cambio climático propuesto por Andersen et al. (2013):

Gráfico 1: Diez pasos estandarizados para la estimación de los impactos del cambio climático

Fuente: Andersen et al. (2014).

Paso 1: El objeto de análisis es el sector agropecuario (agricultura tradicional, agricultura industrial y ganadería) de Bolivia y en cada uno de sus municipios.

Paso 2: El período de análisis es todo el siglo XXI, es decir 2000-2100.

Paso 3: El principal indicador para medir los impactos sobre el sector agropecuario es el PIB agropecuario. Sin embargo, este variable no existe a nivel municipal así que como proxy usamos ingresos per cápita como medido por PNUD (2004) para cada uno de los municipios predominantemente rurales de Bolivia[2]. Aunque no son idénticos, los ingresos rurales se aproximan bien al PIB agropecuario por el siguiente razonamiento. En promedio los ingresos de los hogares llegan a ser 82% del PIB del país, y si esto aplica también al sector agropecuario, los ingresos agropecuarios llegarían a ser 82% del PIB agropecuario. Por otro lado, los ingresos agropecuarios y silvícolas solamente constituyen 80% de los ingresos rurales, por lo que los ingresos rurales y el PIB agropecuario son en promedio muy similares. Sin embargo, puede haber municipios rurales con una fuerte tradición minera, por ejemplo, donde la relación no es tan estrecha.

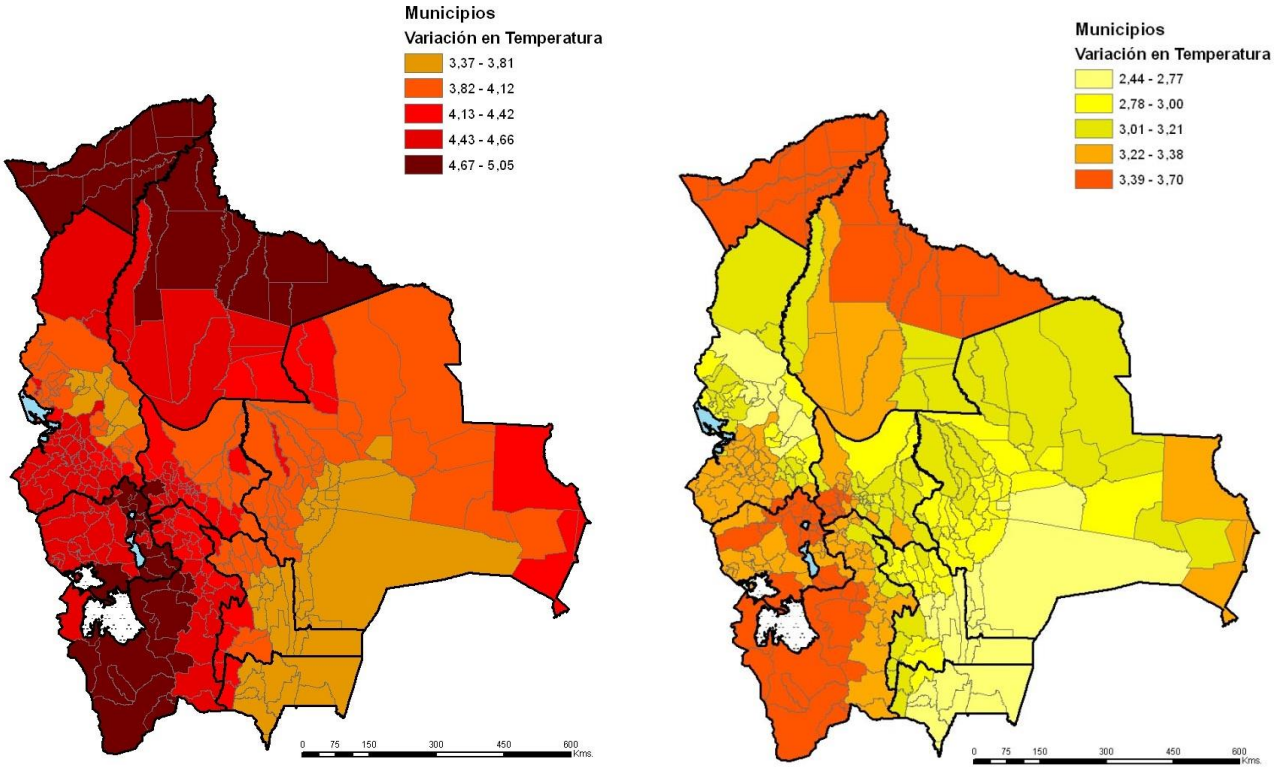
Paso 4: Los principales indicadores del clima son temperaturas promedios anuales y precipitación total anual. Sin embargo, también usamos la variabilidad en estas dos variables y la frecuencia y severidad de precipitaciones fuertes. Los "datos" climáticos usados provienen del modelo regional PRECIS del Centro Hadley en Inglaterra, que tiene una resolución de 50 x 50 km (ver Jones et al., 2004; Alves, 2007; Andrade, 2014). Las simulaciones están disponibles para dos escenarios estándares de IPCC, el A2 (escenario extrema) y B2 (escenario moderado). Contamos con simulaciones del clima referencial que corresponde al periodo 1961-

[2] Igual que PNUD (2004) usamos el consumo per cápita como un proxy de los ingresos per cápita. Esto es válido para el área rural en Bolivia ya que la diferencia entre los dos (el ahorro) está muy cercana a cero. Además, se puede medir el consumo con más confiabilidad que los ingresos que son altamente estacionales e informales en el sector rural. Usamos el consumo per cápita calculado por PNUD (2004) para cada uno de los municipios de Bolivia. Sin embargo, para no confundir el lector, se usa la denominación "ingresos" en vez de "consumo" en el resto del documento.

1990 y el clima futuro, correspondiendo al periodo 2071-2100, lo que nos permite calcular los cambios climáticos esperados, de acuerdo a este modelo, para cada uno de los municipios de Bolivia (ver Mapas 1 y 2).

Mapa 1: Cambios en temperatura medio anual (ºC) entre 1961-1990 y 2071-2100 de acuerdo al modelo PRECIS, escenarios A2 y B2

(a) Escenario A2 (b) Escenario B2



Fuente: Calculado por Andrade (2014) en base a corridas realizadas por el INPE con el modelo PRECIS.

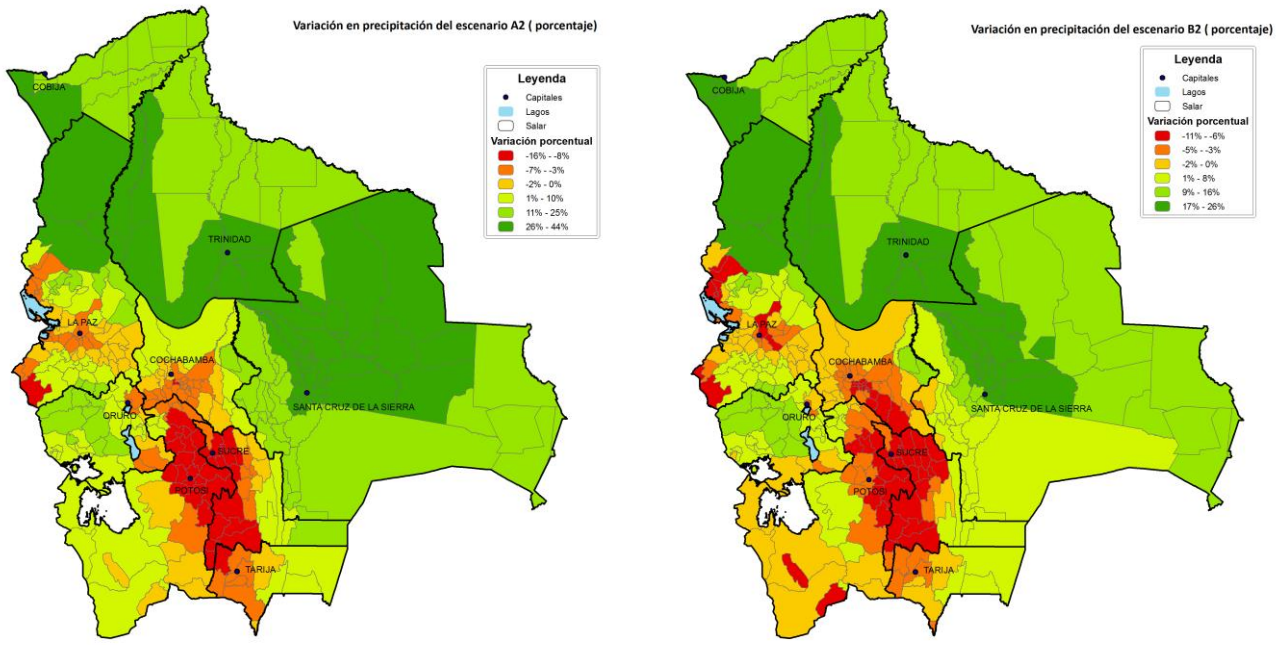
En el escenario A2, las temperaturas medias aumentarían entre 3,4 y 5,1°C, dependiendo del lugar (más calentamiento en el norte del país y en el Altiplano). En el escenario B2, las temperaturas medias aumentarían entre 2,4 y 3,7°C, siguiendo el mismo patrón espacial.

La precipitación muestra un cuadro más variable que la temperatura. Bajo los dos escenarios estudiados, la precipitación promedio disminuye moderadamente en la zona altiplánica (hasta -16%) y se incrementa (hasta 44%) en las zonas bajas.

El máximo incremento en la precipitación se observa en la zona de mayor pendiente de terreno en Bolivia, principalmente en la zona este de los Andes. Aunque esta región corresponde de manera natural a la región en Bolivia donde la precipitación es máxima, el modelo sugiere un incremento relativamente grande en la zona (ver el Mapa 2).

Mapa 2: Cambios en precipitación medio anual (%) entre 1961-1990 y 2071-2100 de acuerdo al modelo PRECIS, escenarios A2 y B2

(a) Escenario A2 (b) Escenario B2



Fuente: Calculado en base a corridas realizadas por el INPE con el modelo PRECIS (ver Andrade, 2014).

Es importante tomar en cuenta que el cambio climático analizado en este proyecto es solo una simulación, y es una entre muchas. Mientras que todos los modelos de simulación del clima indican que la temperatura va a subir durante este siglo, los modelos tienen muchas problemas en predecir los cambios en precipitación, especialmente sobre Bolivia (IPCC, 2007, Capitulo 11).

Pasos 5 y 6: Para estimar las relaciones entre clima y desempeño del sector agropecuario usamos datos a nivel municipal para los municipios predominantemente rurales de Bolivia (municipios donde más de 50% de la población vive en áreas rurales). Los principales datos provienen de la Encuesta Continua de Hogares 2003-2004, que tiene una característica especial e importante para este estudio: es la única realizada de manera continua (durante todo el año), y por esto es la más adecuada para analizar actividades rurales, que son altamente estacionales.

Paso 7: Para establecer el escenario base del sector agropecuario durante el siglo XXI, usamos el mismo modelo de equilibrio general computable que se ha usado para todos los otros estudios sectoriales del presente proyecto (ERECC-Bolivia). Aunque nadie puede saber cómo el sector agropecuario estará estructurado cien años en el futuro, el uso de este modelo garantiza consistencia interna y describe un escenario que es plausible y que obedece las restricciones físicas y económicas de Bolivia. Probablemente es demasiado conservador, ya que no incorpora ningún tipo de innovaciones tecnológicas, como por ejemplo manipulación genética.

Paso 8: El octavo paso de simulación de impactos del cambio climático es el más complejo. En esto estudio tomamos en cuenta no solamente el impacto más directo del cambio en temperaturas y precipitación sobre los rendimientos agrícolas, sino también el efecto neto que surge si se toma en cuenta que los agricultores fácilmente puedan cambiar a cultivos más apropiados para su nuevo clima, además del efecto de fertilización

de CO_2, el impacto de cambios en la frecuencia de eventos extremos, el impacto de cambios en servicios eco-sistémicos, y el impacto de cambios en la disponibilidad de agua para riego.

Paso 9: El noveno paso consiste en monetizar y valorar los impactos. Ya que el análisis hasta este paso ya fue hecho utilizando ingresos, los impactos ya están expresados en dólares reales, y no se necesita hacer una valoración adicional. Sin embargo, en este paso introducimos los impactos en el modelo de equilibrio general computable para poder evaluar también los efectos indirectos y acumulados. El modelo también expresa los resultados en términos de nuestro indicador principal, el PIB agropecuario.

Paso 10: Finalmente, en el último paso interpretamos los resultados para formular recomendaciones de política.

3. Las relaciones empíricas entre el clima y el desempeño del sector agropecuario

Lo primero que tenemos que verificar es que el clima tiene una influencia estadísticamente significativa sobre el desempeño del sector agropecuario, caso contrario no hace sentido seguir con los otros pasos.

En las siguientes sub-secciones demostramos empíricamente las diferentes maneras en que el clima afecta el sector agropecuario en el largo plazo. Empezamos con la relación simple entre variables climáticas y desempeño rural, después analizamos cómo el aumento en la concentración de CO_2 afecta los rendimientos de los cultivos, después veremos el efecto de eventos climáticos extremos, el efecto de pérdida de biodiversidad causada por el cambio climático, y finalmente el efecto de cambios en la disponibilidad de agua para riego.

3.1. Clima e ingresos rurales

Aprovechamos la amplia variación climática entre los municipios de Bolivia para demostrar una relación estadística entre el clima y el sector agropecuario. Sin embargo, como no existen datos sobre el PIB agropecuario al nivel de municipios, usamos ingresos rurales per cápita como un proxy de potencial agropecuario. Como fue argumentado arriba, los ingresos rurales per cápita en municipios predominantemente rurales se constituyen en un buen proxy del PIB agropecuario per cápita.

Para analizar la relación entre variables climáticas e ingresos rurales, se estima un modelo simple a nivel municipal que explica la variación en ingresos per cápita entre municipios en función de variables climáticas (temperatura promedio, temperatura promedio al cuadrado, precipitación promedio, precipitación promedio al cuadrado, variabilidad de temperaturas, y variabilidad de precipitación), controlando por topografía (porcentaje del municipio con pendientes mayores de 25%), aptitud de los suelos para agricultura, probabilidad de inundaciones, densidad de caminos primarios y secundarios, y nivel de educación. Todas las variables de control provienen de la base de datos incluidos en el Atlas de Vulnerabilidad Alimentaria en Bolivia (PMA, 2008).

Los resultados de esta estimación indican que estas variables explican relativamente bien la variación observada en ingresos per cápita entre municipios rurales en Bolivia, ya que el poder explicativo del modelo alcanza 60% (ver Cuadro 1). Las variables temperatura y precipitación son altamente significativas con una relación no-lineal, mientras que las variables que reflejan la variabilidad de temperatura y precipitación no son significativas. La variable dummy de heladas no es significativa (el efecto se capta mejor por temperatura). El coeficiente significativamente positivo de la dummy de inundaciones muestra un efecto positivo en los

ingresos en áreas que sufren inundaciones regularmente (por lo menos una vez cada tres años). Este último resultado puede ser inesperado, pero se debe al hecho que las aguas ayudan a reponer nutrientes en los suelos, al mismo tiempo que las inundaciones son suficientemente regulares y no sorprenden a los habitantes.

La variable más importante es años de escolaridad, lo que tiene un efecto altamente positivo en el nivel de ingresos (en promedio los ingresos per cápita aumentan $81 por cada año extra de escolaridad). La densidad de caminos primarios es otra variable de política que también tiene un efecto positivo sobre los ingresos. Finalmente, una topografía accidentada es asociada con un menor nivel de ingresos.

Cuadro 1: Modelo municipal de ingresos per cápita

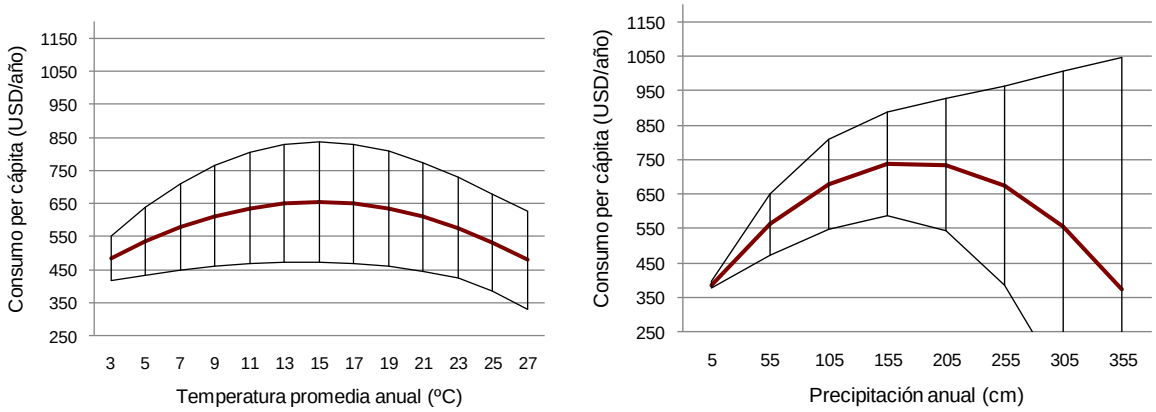
Variables explicativas	Coeficiente estimado	
Constante	-53,920	(-0,52)
Temperatura Promedio	36,056	(2,86) ***
Temperatura Promedio^2	-1,209	(-2,69) ***
Precipitación Promedio	4,241	(4,03) ***
Precipitación Promedio^2	-0,012	(-2,36) **
Desviación Estándar de Temperaturas	-	-
Desviación Estándar de Precipitación	-	-
Dummy de heladas	-	-
Dummy de inundaciones	44,074	(2,15) **
Aptitud de los suelos para agricultura	-24,702	(-2,14) **
Topografía	-1,846	(-4,04) ***
Años de escolaridad	80,683	(9,69) ***
Densidad de caminos primarios	0,365	(2,44) ***
Densidad de caminos secundarios	-	-
# obs = 192	R^2 = 0,5977	

Fuente: Estimación propia.

Notas: Los números en paréntesis son estadísticas t. * Significativo a nivel 10%; ** Significativo a nivel 5%; *** Significativo al nivel 1%;
Las variables explicativas que no fueron estadísticamente significativos a un nivel de 10% fueron excluidos de la regresión.

Las relaciones no-lineales estimadas entre temperatura promedio, precipitación promedio e ingresos per cápita son ilustrados en el Gráfico 2 para facilitar su interpretación. Se nota que niveles intermedios de temperatura y precipitación son más propicios para la productividad, aunque los intervalos de confianza son bastante amplios, especialmente en áreas con mucha precipitación. Esto sugiere que aunque clima es importante, no es definitivo. Los municipios tienen muchas opciones de superar restricciones climáticas, por ejemplo a través de la educación.

Gráfico 2: Relaciones estimadas entre temperatura, precipitación e ingresos per cápita en municipios rurales



Fuente: Elaboración propia.
Nota: Las líneas rojas representan los estimados puntuales del Cuadro 1, mientras que las líneas negras delimitan los intervalos de 95% de confianza (calculados por el comando lincom de Stata).

Estas relaciones van a ser usadas más tarde para simular los impactos netos (con substitución de cultivos) del cambio climático sobre los ingresos rurales. Sin embargo, primero vamos a ver otras maneras que el clima afecta el sector agropecuario.

3.2. Clima y selección de cultivos

Cada cultivo se desarrolla mejor en un tipo de clima que en otro, y si las condiciones se alejan del óptimo los rendimientos disminuyen. Sin embargo el clima óptimo es diferente para diferentes cultivos (quínoa, por ejemplo, prospera en áreas frías y secas, mientras que las banana prefieren un clima húmedo y caliente). Los agricultores pueden aprovechar este hecho, escogiendo los cultivos más aptos para el clima dado.

Para comprobar que los agricultores realmente usan diferentes cultivos en diferentes climas, estimamos modelos de elección discreta (*multinomial logit*) para cuatro diferentes grupos de cultivos (tubérculos, cereales, hortalizas y otros).

Los datos que se emplean provienen de la Encuesta Continua de Hogares 2003-2004, donde se tiene datos de hogares de 178 municipios en Bolivia de un total de 327. La encuesta 2003-2004 tiene una característica especial, ya que es la única realizada de manera continua (durante todo el año), por lo cual se considera este tipo de encuestas más representativas especialmente a nivel rural, teniendo en cuenta la estacionalidad de la producción agropecuaria.

En la regresión se incluyeron variables climatológicas a nivel municipal: temperatura y precipitación promedio, desviación estándar de la temperatura y precipitación, características municipales como la aptitud de los suelos para agricultura, nivel educativo, entre otras (ver el Cuadro 2).

Cuadro 2: Estimación de la relación entre elección de cereales e ingresos per cápita a nivel municipal

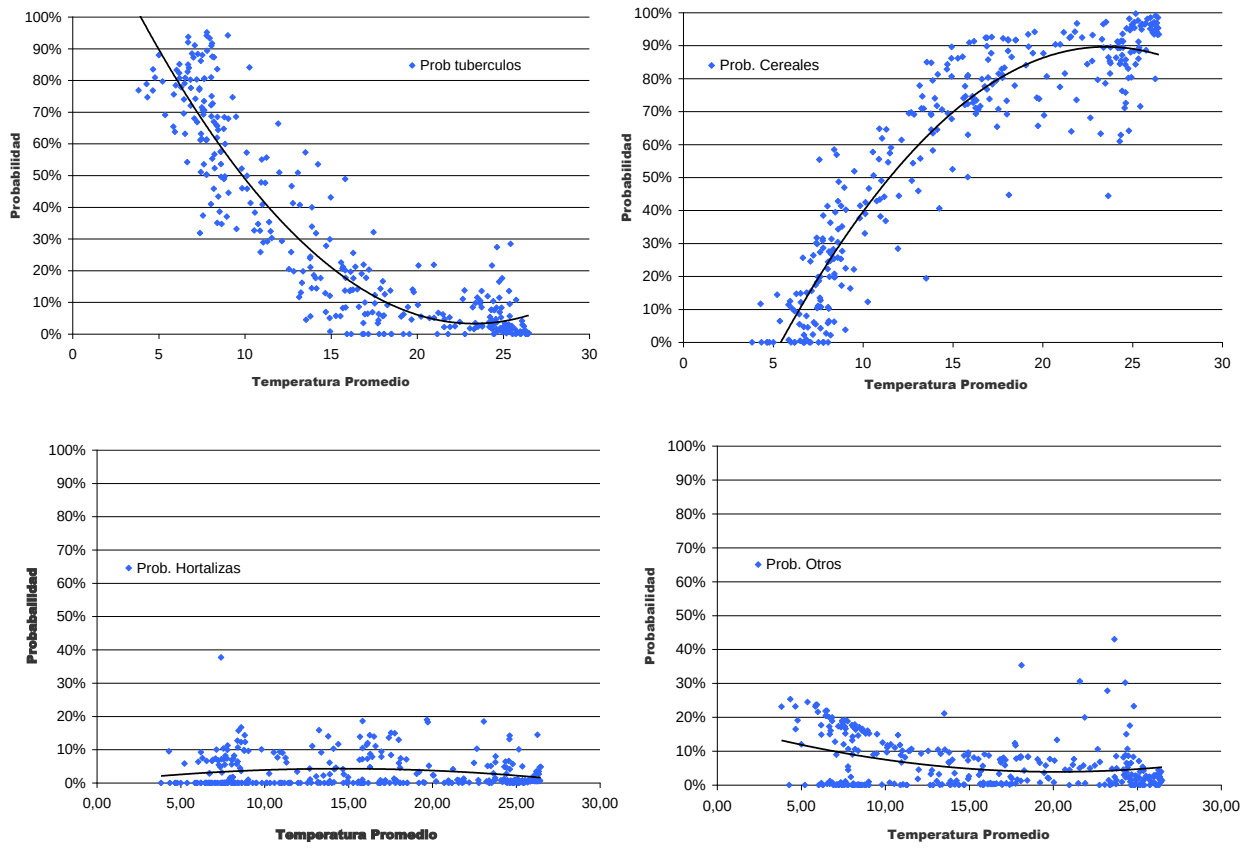
Variables explicativas	Coeficiente estimado	
Constante	-384,9	(-5,0) ***
Probabilidad de Producir Cereales	480,5	(2,5) ***
Probabilidad de Producir Cereales^2	-295,8	(-1,7) *
Dummy de heladas	23,2	(2,7) ***
Dummy de inundaciones	-	-
Aptitud de los suelos para agricultura	31,4	(2,4) **
Nivel de biodiversidad	0,1	(3,6) ***
Topografía	-	-
Años de escolaridad	163,4	(22,2) ***
Densidad de caminos primarios	0,4	(-1,8) *
Densidad de caminos secundarios	-	-
# obs = 326	R^2 = 0,6495	

Fuente: Estimación propia.

Notas: Los números en paréntesis son estadísticas t; * Significativo a nivel 10%; ** Significativo a nivel 5%; *** Significativo al nivel 1%.

El Gráfico 3 muestra las probabilidades de escoger tubérculos, cereales, hortalizas y otros cultivos, en función de la temperatura promedio en cada municipio.

Gráfico 3: Probabilidad de elección de cultivos respecto a la temperatura promedio a nivel municipal

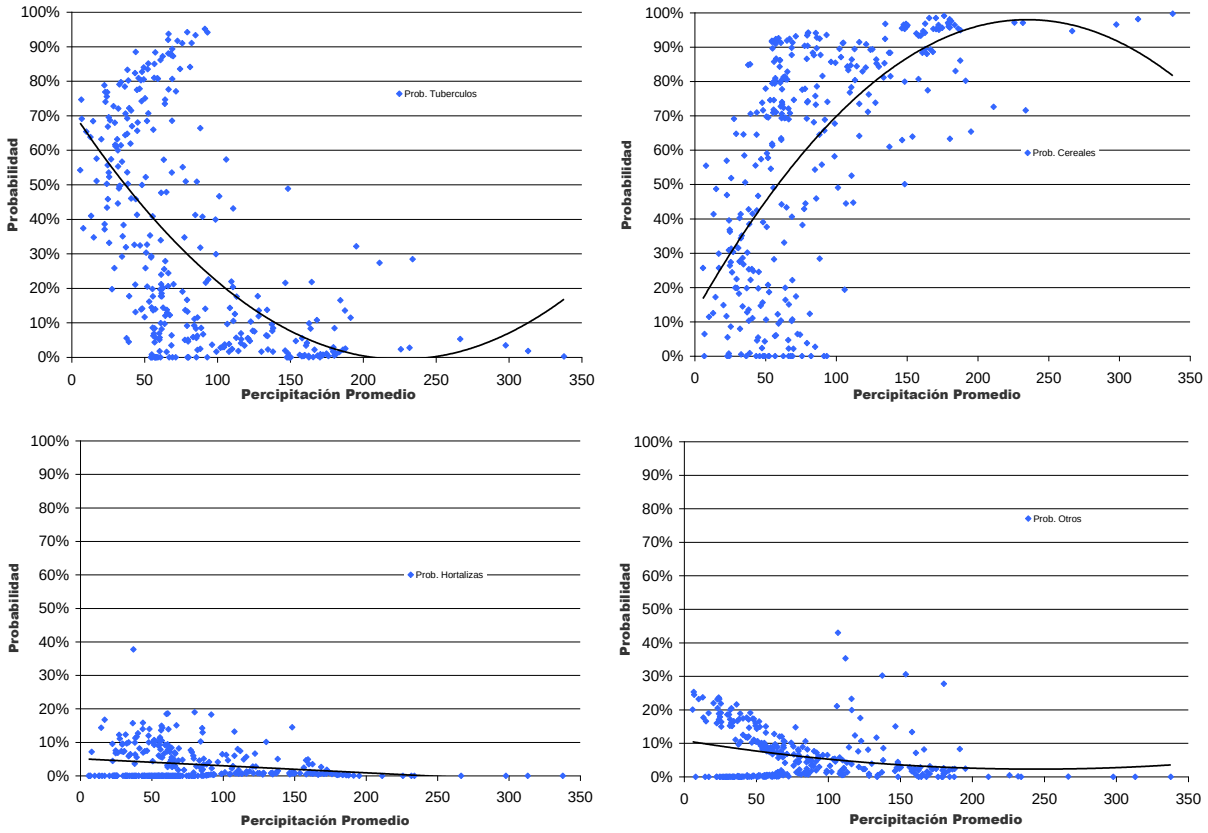


Fuente: Elaboración propia

La probabilidad de cultivar tubérculos disminuye a mayor temperatura, mientras que la de cereales aumenta con la temperatura. Por otro lado las hortalizas parecen tener poca probabilidad de ser cultivados independientemente del nivel de temperaturas. La producción de frutas, estimulantes y productos industriale*s,* tiene pocas probabilidades de ser cultivados, donde se ve un pequeño incremento en los rangos altos de temperatura consecuencia de la producción de productos industriales y frutas.[3]

En el Gráfico 4 se muestran las mismas estimaciones probabilísticas pero en función del nivel promedio de precipitación en cada municipio.

Gráfico 4: Probabilidad de elección de cultivos respecto a la precipitación promedio a nivel municipal



Fuente: Elaboración propia

Ante mayor precipitación la probabilidad de producción de cereales aumenta, mientras que en ambientes más secos la probabilidad de producción de tubérculos es mayor. Al igual que en el análisis de la temperatura, la precipitación parece no tener efectos muy grandes sobre la decisión de hortalizas y otros.

Estos cambios en las probabilidades de elección de cultivos, ante cambios en la temperatura y precipitación, son usados en la sección 5 para estimar los beneficios potenciales de sustitución de cultivos por aquellos que sean más apropiados al nuevo clima previsto por el modelo PRECIS.

[3] Ver el anexo.

3.3. El efecto de fertilización de CO_2

Una parte fundamental del cambio climático que hemos ignorado hasta ahora es el aumento en la concentración de CO_2 en la atmósfera. Dado que estamos analizando específicamente los cambios climáticos que son causados por el aumento de la concentración de CO_2 (y otros gases de efecto invernadero) y no por ninguna otra razón, es importante considerar este componente. Dado que la concentración de CO_2 no varía de un lugar a otro, no se podría incluir esta variable en el modelo econométrico municipal de la sub-sección anterior, ni en los modelos a nivel de cultivos. Sin embargo, existen miles de estudios experimentales del efecto de CO_2 sobre los rendimientos de diferentes cultivos[4], y en este apartado analizamos los que son más relevantes para el caso boliviano, es decir estudios experimentales sobre soya, arroz, maíz y papa, que son los principales cultivos de Bolivia en la actualidad (aunque no necesariamente al final del siglo).

Mientras que las personas necesitan oxígeno para respirar y vivir, las plantas necesitan CO_2. A través del proceso de fotosíntesis usan el CO_2, junto con el agua, para crear celulosa, el componente principal de todas las plantas. Para crear substancias más complicadas, como proteínas, también necesitan nitrógeno, potasio, sulfura y muchos otros elementes, pero CO_2 y agua son siempre esenciales. Sin embargo, mientras que el oxígeno es relativamente abundante (1 en 5 moléculas del aire es oxígeno), el CO_2 es muy escaso (1 en 2.500 moléculas).

Una de las maneras en que las plantas captan más CO_2 es a través de estomas[5] ("bocas" en las hojas), pero esto viene al costo de perder más agua por respiración. Esto puede ser una buena estrategia en lugares húmedos con abundante disponibilidad de agua, pero no en lugares muy árida. Por eso, las plantas en áreas relativamente áridas y con bajos niveles de CO_2 han desarrollado un sistema de captación de carbono más eficiente: ellas fijan el CO_2 por la vía de 4 carbonos (C4) en vez de 3 carbonos (C3). Entre las plantas C4, se encuentran maíz y caña de azúcar y otros cereales importantes para la alimentación humana. En términos geológicos, estos cultivos se han desarrollados relativamente reciente y son optimizados para el clima actual de escasez de CO_2 y agua. En cambio, la gran mayoridad de las plantas (el 95% de las especies existentes) se han desarrollado en épocas de mayor disponibilidad de CO_2 y agua que ahora, y por eso se sienten muy restringidos en el acceso a sus elementos vitales. Esto explica por qué la gran mayoridad de cultivos (y plantas en general) responden muy positivamente a experimentos que aumentan la concentración de CO_2 en la atmósfera.

Abajo revisamos rápidamente algunos estudios experimentales para la producción agropecuaria de Bolivia, para ver el efecto que se podría esperar del aumento en CO_2.

---

[4] El sitio www.CO2science.org tiene una colección de más de mil estudios sobre el efecto de fertilización de CO_2 sobre un gran variedad de diferentes cultivos.

[5] Las estomas son los pequeños poros de las plantas localizadas en la superficie de sus hojas. Son los principales participantes en la fotosíntesis, ya que por ellos transcurre el intercambio gaseoso mecánico, es decir que en este lugar sale el oxígeno y entra el CO_2. Sin embargo, su apertura también provoca la pérdida de agua de la planta en forma de vapor a través del proceso denominado transpiración. Por esto, la apertura o cierre de las estomas está muy finamente regulada en la planta por factores ambientales como la luz, la concentración de CO_2 y la disponibilidad de agua. Con mayores niveles de CO_2, la planta no necesita abrir tanto sus estomas, por lo que se reduce la pérdida de agua por transpiración.

Estudios sobre soya

Los experimentos consisten en hacer crecer una gran cantidad de plantas de soya durante una temporada, y dividirlos en grupos que estén expuestos a diferentes niveles de CO_2. Sin embargo, algunos estudios también investigan los efectos del CO_2 bajo diferentes niveles de temperaturas y con diferentes restricciones de agua.

Por ejemplo, Ferris et al. (1999) sembraron soya en invernaderos con concentraciones de CO_2 de 360 y 700 ppm, y dejaron crecer las plantas por 52 días, antes de exponerlas a diferentes tipos de estrés ambiental durante el periodo clave de crecimiento de las semillas. Para un período de ocho días, algunas de las plantas fueron expuestas a temperaturas 15ºC mayores que las plantas de control y otro grupo fue expuesto a una sequía con niveles de humedad en el suelo 60% más bajos que los de las plantas de control.

Al final de la temporada midieron la biomasa total y la biomasa de las semillas de los diferentes grupos y encontraron que, en promedio, la biomasa de las plantas expuestas a 700 ppm de CO_2 fue 41% mayores que la biomasa de las plantas expuestas a 360 ppm, y la biomasa de las semillas con altos niveles de CO_2 fue 32% mayores. También encontraron que mayores temperaturas y menor humedad redujeron la biomasa. Adicionalmente, vieron que niveles más altos de CO_2 ayudan a reducir los efectos negativos de altas temperaturas y falta de agua, ya que plantas expuestas a altos niveles de CO_2, altas temperaturas y poca agua, rindieron 50% más en biomasa de semillas que plantas expuestas a niveles normales de CO_2, altas temperaturas y poca agua.

Entre los 190 estudios experimentales encontrados, que analizan el efecto de un aumento de la concentración de CO_2 de 300 ppm o más sobre soya, solamente 3 encontraron una reducción en producción de biomasa. El promedio de los 190 estudios mostraba un aumento en biomasa de 45,5%[6].

Estos resultados sugieren la importancia de la investigación en el desarrollo de semillas que responden favorablemente a la fertilización de CO_2, ya que puede significar grandes diferencias en los rendimientos futuros.

Sin embargo, Long et al. (2005) sugieren que los experimentos controlados en invernaderos exageran el efecto de fertilización de CO_2 en comparación con condiciones más realistas en aire libre con competencia fuerte entre cada planta. Por su parte, Ainsworth y Long (2005) sugieren que las plantas podrían aclimatarse a concentraciones de CO_2 gradualmente crecientes resultando en menores efectos que los mostrados en los experimentos de aumentos grandes.

Travasso et al. (2007) revisan las experiencias especialmente para la zona de expansión reciente de soya en Brasil, Argentina, Uruguay y Bolivia para calibrar un modelo de crecimiento diario de soya. El estudio encuentra que en el escenario A2, el rendimiento de soya podría aumentar en hasta 62,5% debido a que los efectos positivos de la fertilización de CO_2 y el aumento en precipitación durante primavera y verano más que compensan el efecto negativo de temperaturas más altas. De acuerdo con su modelo, el nivel doble de CO_2 aumentaría la eficiencia de fotosíntesis en la planta de soya en 40%.

[6] Ver la base de estudios en: http://www.co2science.org/data/plant_growth/dry/g/glycinem.php.

Estudios sobre arroz

Arroz es una planta C4, y por eso se podría esperar menores aumentos en productividad que en el caso de soya. Sin embargo, varios estudios muestran aumentos muy grandes por la fertilización de CO_2 para ciertos tipos de arroz. Por ejemplo, Ziska, Manalo & Ordonez (1996) analizaron la respuesta de 17 diferentes cultivares de arroz y encontraron que unas pocos especies no mostraban aumentos en rendimiento al aumento de CO_2 desde 373 ppm hasta 664 ppm, mientras que el mayor efecto se encontraron en un especie de arroz japónico de Brasil que mostró aumentos espectaculares de 265% en biomasa total y de 350% en la biomasa de los granos.

Igualmente, el estudio de De Costa et al. (2007) estudió 16 diferentes cultivos de arroz en Sri Lanka y encuentra aumentos en productividad en el rango de -5% hasta +320%. Baker (2004) solamente investiga 3 diferentes especies de arroz cultivadas en el sur de Estados Unidos y encuentra aumentos en el peso de los granos de 46%, 57% and 71% como respuesta a la duplicación de la concentración de CO_2. Finalmente, Widodo et al. (2003) encontraron que mayores niveles de CO_2 también reducen los efectos negativos de estrés hídrico, como en el caso de soya.

Estudios sobre maíz

El maíz también es una planta C4, y es el cultivo que generalmente muestra menores beneficios debido al aumento en la concentración de CO_2 (Parry et al., 2004). El estudio de Maroco, Edwards & Ku (1999) muestra aumentos en biomasa de solamente 20% cuando aumentarían la concentración de CO_2 de 350 ppm hasta 1.100 ppm. Sin embargo, esos autores encontraron que la eficiencia en el uso de agua aumentó en 225% para los altos niveles de CO_2, lo que significa que el maíz puede tener ventajas en áreas muy áridas como el Altiplano de Bolivia, donde las condiciones para cultivos C3 no son óptimas.

Estudios sobre papa

El estudio de Olivo et al. (2002) es de particular interés para Bolivia ya que compara los efectos de CO_2 sobre papas de tierras altas y de tierras bajas. En experimentos en cámaras abiertas con niveles de CO_2 de 350 ppm y 700 ppm respectivamente, encontraron aumentos en las tasas de fotosíntesis de 56% y 53% para papas de tierra alta y tierra baja, respectivamente. Al mismo tiempo la eficiencia en el uso de agua aumentó en 90% y 80%, respectivamente, y el peso seco de los tubérculos aumentó en 84% y 40%. Esto sugiere que las papas de tierras altas responden igual o mejor a la fertilización de CO_2 que las papas de tierras bajas, de los cuales existen mucho más estudios.

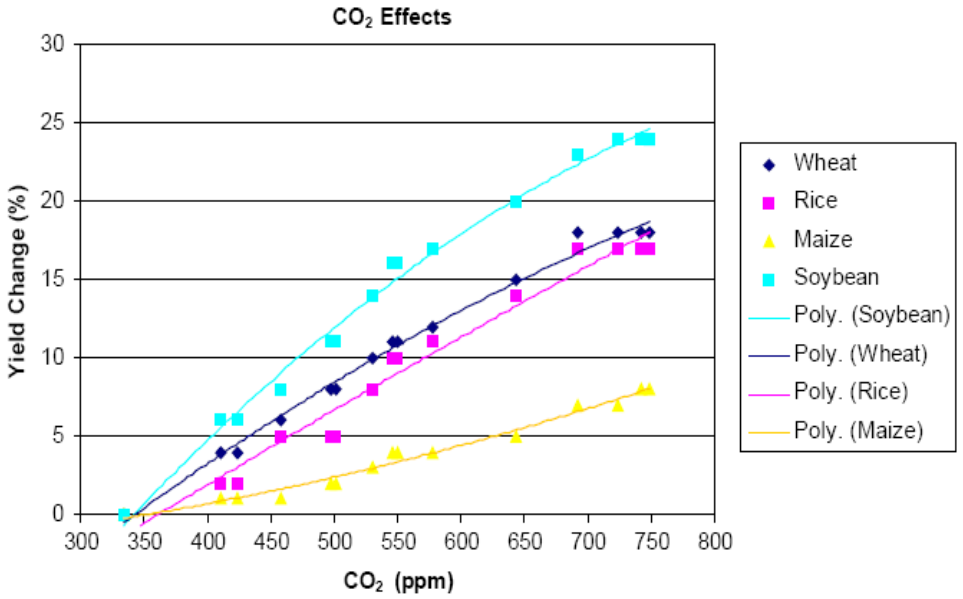
Sicher & Bunce (1999) investigan en cámaras abiertas durante tres temperadas seguidas. En promedio, la duplicación de CO_2 causó un aumento de las tasas de fotosíntesis del 49%, aunque también demuestra que había un efecto de aclimatación (indicado por una reducción de 21% en la actividad de la enzima RuBisCo), como fue sugerido por Long et al. (2005). El efecto total en rendimientos era del 44% más tubérculos y 40% más peso seco de los tubérculos.

Resumen de los efectos de aumentos en CO2 en el rendimiento de cultivos

Para un estudio de los efectos del cambio climático sobre la producción global de alimentos, Parry et al. (2004) usan los aumentos en rendimientos por fertilización de CO_2 mostrados en el Gráfico 5. Con aumentos de 7-24% en respuesta a la duplicación de la concentración de CO_2, estos valores son bastante conservadores a la comparación con los resultados experimentales citados anteriormente. Es porque toman en cuenta las críticas de Long et al. (2005) y Ainsworth y Long (2005), que sugieren que los resultados de los experimentos en invernaderos no son realistas, ya que no existe el mismo nivel de competencia entre las plantas como en

condiciones de producción agrícola real. En esto estudio usamos estas mismas curvas para simular los efectos de fertilización de CO_2 sobre los rendimientos agropecuarios.

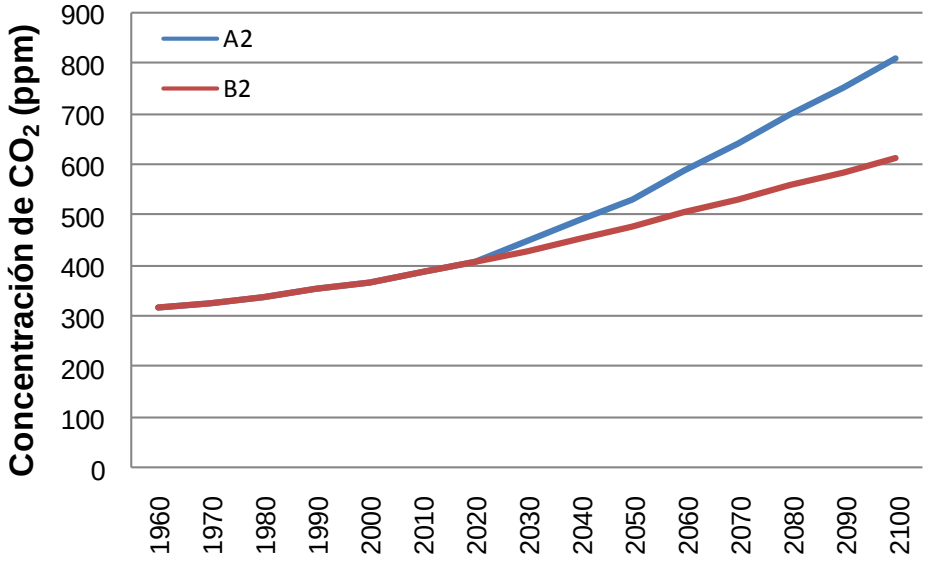
Gráfico 5: Impacto de la fertilización de CO_2 sobre el rendimiento de diferentes cultivos



Fuente: Parry et al. (2004).

Las curvas del Gráfico 5 se pueden transformar a curvas en el tiempo, usando los aumentos esperados en CO_2 durante el siglo, bajo los escenarios A2 y B2 (ver el Gráfico 6). En el escenario A2 llegaríamos a una concentración de CO_2 un poco por encima de 800 ppm al final del siglo mientras que en el escenario más moderado, B2, llegaríamos a una concentración de aproximadamente 600 ppm.

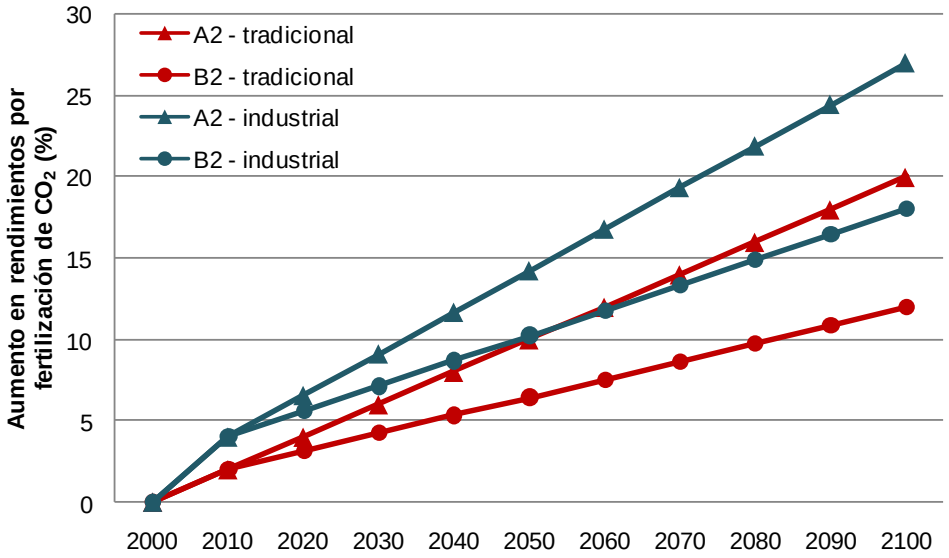
Gráfico 6: Concentración de CO_2 en la atmósfera, escenarios A2 y B2



Fuente: Escenarios SRES de IPCC (2007).

Suponemos que la curva de soya es representativa para el sector agropecuario industrial mientras que la curva de arroz es representativa para el sector agropecuario tradicional. Esto nos da las curvas en el Gráfico 7 para aumentos de rendimientos en los dos sectores agropecuarios en los dos escenarios, los cuales usamos para la estimación de impactos de fertilización de CO_2 en la sección de simulación de impactos del cambio climático.

Gráfico 7: Aumento en rendimientos agropecuarios por fertilización de CO_2, escenarios A2 y B2, sectores tradicional e industrial



Fuente: Elaboración propia.

El efecto del aumento en eventos climáticos extremos

Posiblemente más importante que los cambios lentos en los promedios de temperatura y precipitación, son cambios en la frecuencia y severidad de eventos climáticos extremos. En un clima más caliente, el aire puede contener más humedad, lo que significa que puede pasar más tiempo sin lluvia, pero que una vez que se llega al punto de saturación, la lluvia cae con más fuerza. Esto dificulta la absorción del agua en los suelos, llevando a problemas de inundaciones. Este fenómeno es recurrente en Bolivia, pero se espera que con el cambio climático el problema vuelva más frecuente y más severo.

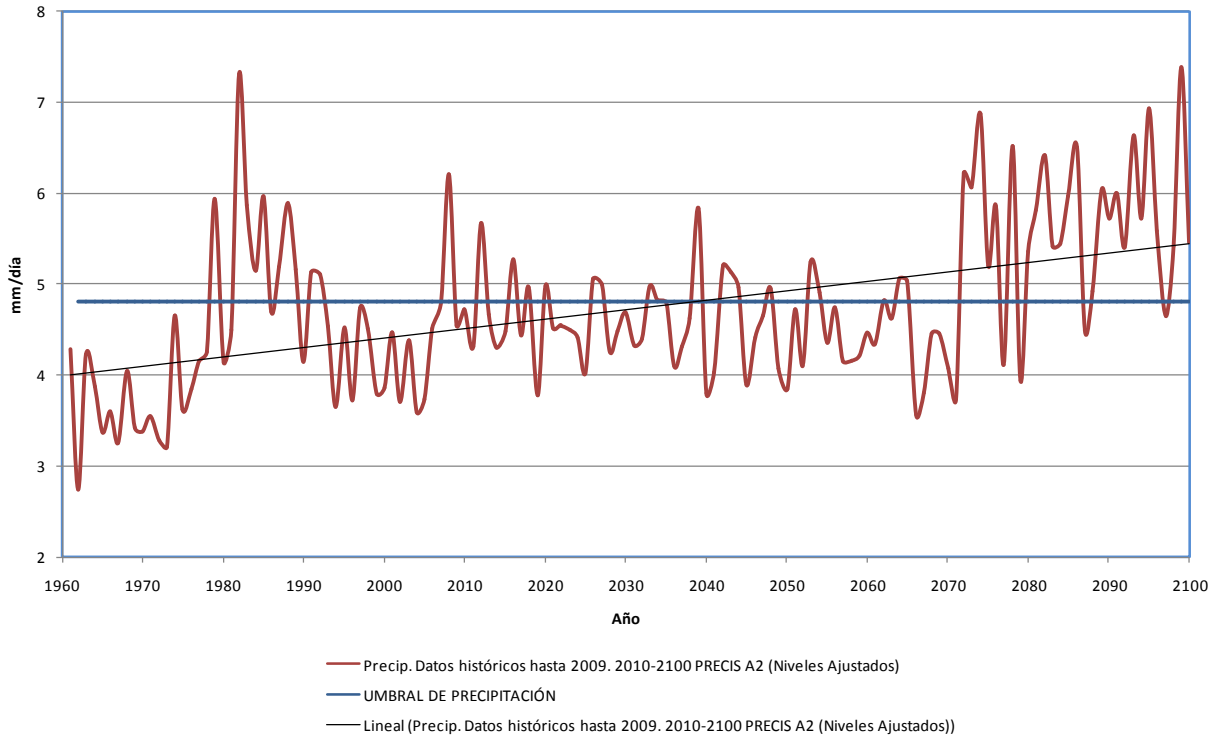
Arenas (2014) calcula los efectos de los cambios climáticos estimados por el modelo climático PRECIS sobre la ocurrencia de eventos extremos en Bolivia, tomando como referencia los efectos del Niño y la Niña durante los años 2006-2008. En Beni, las inundaciones de El Niño de 2006/2007 causaron un daño importante en la ganadería. El informe de CEPAL (2007) señala que la superficie afectada por la inundación fue estimada por la Federación de Ganaderos del Beni (FEGABENI) en 8 millones de hectáreas, significando una anegación del 70% de las tierras de pastoreo de ganado. La FEGABENI estimó en 2,2 millones las cabezas que fueron afectadas, lo que representó el 74% del total de ganado del departamento. El 6% del total de ganado del Beni habría muerto a causa de las inundaciones. Además, 110 mil hectáreas de cultivo de soya en Santa Cruz se perdieron por las inundaciones, 40 mil hectáreas de cultivos de arroz en Beni y Santa Cruz, y 35 mil hectáreas se perdieron en otros cultivos: maíz, quinua, papa, cebada, trigo, banano, plátano, cebolla, haba, yuca, alfalfa, arveja y fréjol (Arenas, 2014).

En el marco del Plan Nacional de Rehabilitación y Reconstrucción, se efectuó un relevamiento de la demanda de proyectos de rehabilitación y reconstrucción en todos los municipios afectados por estos eventos extremos.

En total, las inundaciones dejaron pérdidas económicas por 410 millones de dólares en la ganadería y la agricultura, especialmente en las tierras bajas de Beni y Santa Cruz.

Según el modelo PRECIS, precipitaciones extremas van a volver más frecuentes y más fuertes en el futuro. El Gráfico 8 muestra precipitaciones promedias diarias en el departamento de Santa Cruz durante la época de lluvia desde 1961 hasta 2100 de acuerdo al modelo PRECIS. Durante el periodo de referencia, 1961-1990, hubieron 6 años de los 30 donde el nivel de precipitaciones superó el umbral donde empieza a causar problemas serios para el sector agropecuario. En cambio, en el periodo futuro, 2071-2100, esto ocurriría en 25 de los 30 años. Es decir, según el modelo PRECIS, casi cada año vamos a experimentar inundaciones catastróficas.

Gráfico 8: Precipitaciones en Santa Cruz 1961-2100, Escenario A2



Fuente: Arenas (2014).

Arenas (2014) calcula el efecto del aumento en eventos extremos sobre el sector agropecuario en Bolivia durante el periodo 2071-2100 (ver el Cuadro 3). Los departamentos de Beni y Santa Cruz absorben el 86% de estos impactos.

Cuadro 3: Estimación de impactos sobre el sector agropecuario en Bolivia causado por el aumento en eventos extremos en 2071-2100 en comparación con el periodo de referencia, 1961-1990 (Escenario A2)

Departamento	Cambio porcentual del PIB departamental
Beni	-27,6
Chuquisaca	-1,0
Cochabamba	-0,4
La Paz	-0,3
Oruro	-0,5
Pando	-0,0
Potosí	-0,9
Santa Cruz	-3,2
Tarija	-0,1
Bolivia	-0,55

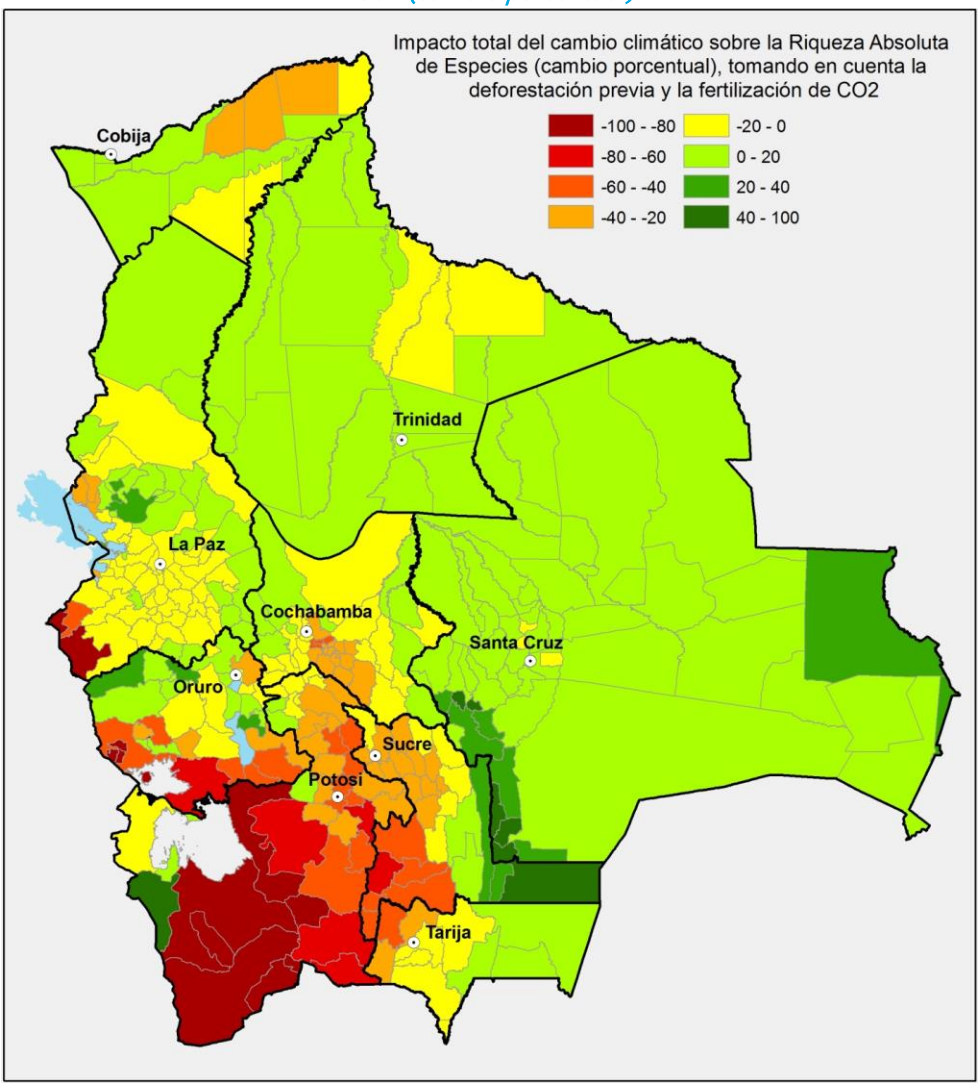
Fuente: Arenas (2014).

En total, el impacto directo de eventos climáticos extremos sobre el sector agropecuario se ha estimado en 0,55% del PIB el año 2100.

Impactos de cambios en biodiversidad causados por el cambio climático

En Bolivia, el sector ganadero normalmente aprovecha las enormes extensiones de pastos naturales que existen en el Altiplano y en las pampas de Beni. Sin embargo, el éxito de la ganadería depende de la existencia de una variedad de especies vegetales naturales para el pastoreo. Andersen (2014) muestra que esta vegetación natural, especialmente en el Altiplano, está en riesgo debido al cambio climático.

Mapa 3: Impacto total del cambio climático en el escenario A2 sobre la Riqueza Absoluta de Especies en Bolivia tomando en cuenta la deforestación y la fertilización de CO2 (cambio porcentual)



Fuente: Andersen (2014).

El Mapa 3 muestra los impactos calculados por Andersen (2014) sobre el nivel de riqueza de especies (una medida de biodiversidad) de los cambios climáticos previstos por el modelo PRECIS en el escenario A2. En Beni se esperaría un pequeño aumento en la riqueza de especies, debido a mayores temperaturas y mayor precipitación, lo que significa que el ganado vacuno probablemente no sufriría por este problema. Sin embargo, la ganadería de camélidos y ovejas en el Altiplano podría sufrir por falta de alimentación, ya que de acuerdo a la simulación de Andersen (2014), se podría perder más de la mitad de la biodiversidad por hectárea en grandes partes del Altiplano.

Demostrando econométricamente una relación positiva entre riqueza de especies e ingresos per cápita, Andersen (2014) calcula el impacto económico de la reducción en biodiversidad para cada uno de los municipios de Bolivia. Debido a que la población boliviana está concentrada en los departamentos dónde se

prevé reducciones en biodiversidad, a nivel nacional se prevé que el cambio climático causaría una pérdida del 0,9% de los ingresos a finales del siglo XXI. Los departamentos más adversamente afectados serían Potosí y Chuquisaca, justamente los departamentos más pobres (ver el Cuadro 4).

Cuadro 4: Costo económico de la pérdida de biodiversidad causado por los cambios climáticos a 2100 bajo el escenario A2, por departamento en Bolivia

Departamento	Cambio en la Riqueza de Especies entre 2000 y 2100 atribuible al cambio climático (%)	Impacto sobre los ingresos (%)
Beni	+2	+0,3
Chuquisaca	-7	-2,8
Cochabamba	-1	-1,2
La Paz	+1	-0,9
Oruro	-16	-1,9
Pando	-6	+0,1
Potosí	-41	-4,8
Santa Cruz	+9	+1,1
Tarija	+2	-1,0
Bolivia	+2	-0,9

Fuente: Andersen (2014).

Nota: La primera columna está calculada con promedios ponderados por el área de cada municipio mientras que la segunda columna está calculada con promedios ponderados por la población en cada municipio en 2001.

4. Un escenario base para el sector agropecuario en Bolivia hasta 2100

Para poder simular los impactos del cambio climático, es necesario primero establecer un escenario base para determinar las actividades que podrían ser afectados por el cambio climático. No se esperaría que el sector mantenga su estructura y tamaño actual durante el resto del siglo. El propósito de esta sección es establecer una línea base que describa la evolución posible del sector bajo el supuesto que el clima se mantiene igual al período base (1961-1990).

Para asegurar la consistencia interna del escenario base y la consistencia con todos los otros estudios sectoriales del mismo proyecto, se usa un Modelo de Equilibrio General Computable, BOLIXXI, calibrado para reflejar los grandes cambios que se espera en Bolivia hasta el año 2100. El modelo y todos los supuestos para el escenario base común están descritos en Jemio et al. (2014). En esta sección se profundiza la descripción del sector agropecuario.

4.1. La situación actual del sector agropecuario en Bolivia

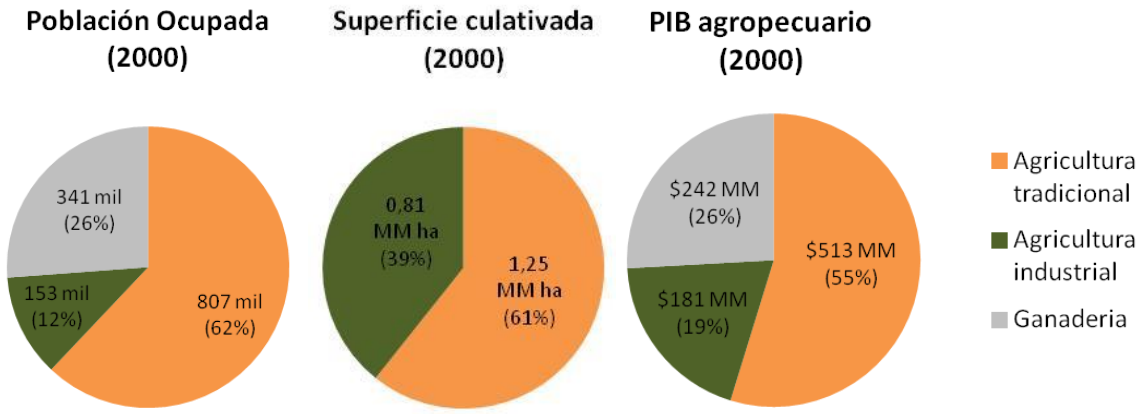
Bolivia tiene un territorio de más de 1 millón de km^2 ubicado en la zona inter-tropical en el centro de América del Sur. Sin embargo, la presencia de la Cordillera de los Andes en la parte occidental y central del país introduce grandes variaciones en los rasgos biofísicos del país, en cuanto a formas del terreno, clima, suelos y vegetación (Morales et al., 2000) y esto afecta de manera importante todo el sector agropecuario.

Se considera normalmente tres grandes macro-regiones en Bolivia: 1) La región altiplánica, que ocupa el 28% del territorio, presenta un clima frío y con baja precipitación; 2) la región de los valles, que se encuentra entre el altiplano y los llanos orientales, abarca el 13% del territorio y presenta un clima templado a cálido; 3) los llanos, que abarcan el 59% de la superficie nacional, se ubican al norte y este de la cordillera Oriental y tienen un clima tropical con temperaturas altas.

Es también importante notar que la producción agrícola en Bolivia se encuentra marcada por un dualismo. Mientras que la producción tradicional es realizada para el mercado local y para el consumo de subsistencia, la producción industrial está organizada en superficies grandes de territorio, parcialmente mecanizada y modernizada, y con una fuerte orientación hacia la exportación (UDAPE, 2004).

El sector agropecuario tradicional de Bolivia, conformado por pequeños productores campesinos, ha sido y sigue siendo todavía el principal abastecedor de alimentos que consume el país, aunque cada vez en menor medida (UDAPE, 2004). En cambio, el sector agropecuario industrial utiliza solamente una pequeña parte de su producción para abastecer al mercado interno, exportando la mayor parte de su producción.

Gráfico 9: Empleo, PIB y área sembrada, sector agropecuario en Bolivia 2000



Fuente: Elaboración propia en base a información del modelo BOLIXXI de Jemio et al. (2014).

El Gráfico 9 muestra el número de personas ocupadas en los sectores de agricultura tradicional, agricultura industrial y ganadería en Bolivia en el año 2000; y también el PIB generado por estos tres sub-sectores. Se nota que la agricultura tradicional fue la más importante al principio del siglo con más de 800 mil ocupados y más de US$ 500 millones en PIB de este sub-sector. También es responsable de más de la mitad del área sembrada (ver Gráfico 9).

Sin embargo, la marcada diferencia entre los sectores tradicional e industrial va a desaparecer gradualmente durante el siglo XXI. El grupo de agricultores tradicionales gradualmente van a volver más modernos, con más educación, más tecnología y mayores extensiones de tierra. Geográficamente, ellos se van a mezclar con los agricultores industriales del oriente, porque es donde existen mayores oportunidades de expansión de la frontera agropecuaria. También se van a insertar gradualmente en el comercio internacional, volviéndose exportadores, aprovechando que Bolivia tiene ventajas comparativas en el sector agropecuario por la relativa abundancia de tierra.

Por estas razones, se va a establecer el escenario base hasta 2100 para todo el sector agropecuario en su conjunto, sin tratar de distinguir entre los diferentes tipos de actores. En el resto de esta sección se muestra como se ha construido el escenario base para el sector agropecuario, es decir un escenario contra-factual que describe cómo este sector podría desarrollarse durante el resto de este siglo si el clima se mantuviera similar al clima observado en nuestro periodo de referencia (1961-1990).

4.2. Proyecciones de población

Lo primero que debemos conocer al momento de analizar los efectos del cambio climático sobre el sector agropecuario es el número de personas afectadas, por lo que se estima la evolución probable de la población urbana y rural de Bolivia hasta 2100.

El Instituto Nacional de Estadísticas (INE) ha elaborado proyecciones de población rural y urbana hasta 2030 en el ámbito departamental, y CEPAL ha extendido estas proyecciones a nivel nacional hasta 2100. Dadas las características propias de la producción agropecuaria es necesario realizar una desagregación de las proyecciones nacionales hasta nivel municipal rural/urbana, y a continuación se explica la metodología aplicada.

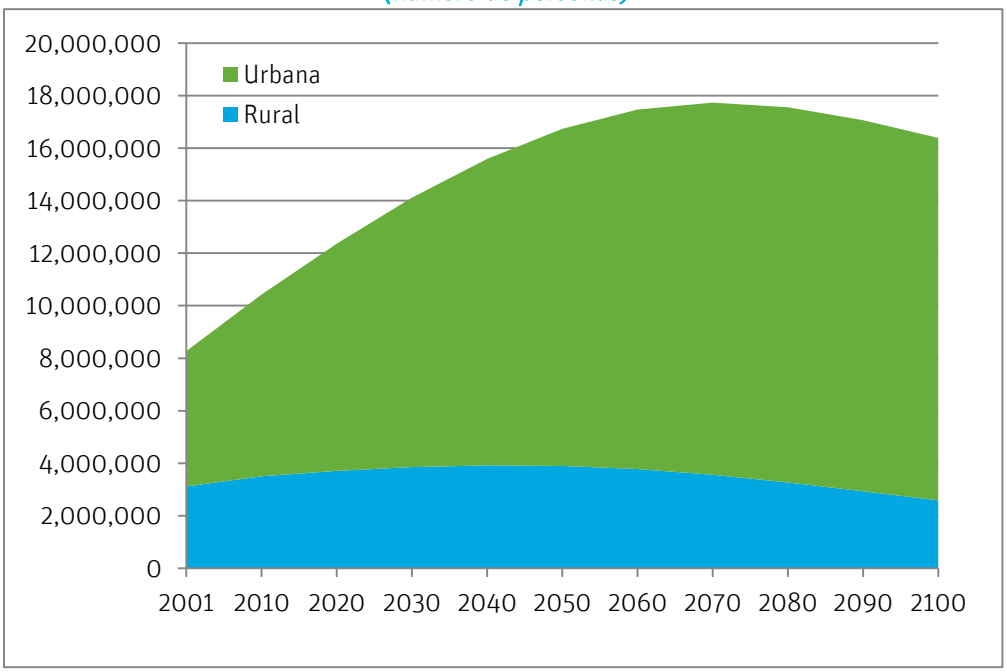
Primero, se extiende las proyecciones sobre la tasa de urbanización a nivel nacional. En el año 2001 el 62% de la población vivía en áreas urbanas (conglomeraciones con más de dos mil habitantes) y de acuerdo con las proyecciones oficiales de INE, este porcentaje crecerá hasta 73% en 2030. Hemos extendido la tendencia llegando a 84% en 2100, lo que corresponde aproximadamente al nivel actual promedio de los países que tienen el nivel de ingreso per cápita que esperamos para Bolivia el año 2100[7]. El aumento en la tasa de urbanización se explica por el proceso de migración rural-urbana, que se ha observado en todos los países del mundo, incluyendo Bolivia.

Junto con las proyecciones de población de CEPAL hasta 2100, esto implica la evolución de la población nacional indicado en el Gráfico 10. Se nota que la población total llegaría a un máximo de 17,7 millones el año 2070, para después caer a un nivel de 16,4 millones el año 2100. La población rural, sin embargo, llegaría a su máximo de 3,9 millones ya en 2040 y después empieza a caer hasta 2,6 millones en 2100.

Este comportamiento poblacional previsto implica que las futuras tasas de crecimiento de la población rural sean muchos menores que los que se han visto en el pasado, siendo incluso negativas durante la mayor parte del siglo XXI. Esto tiene importantes implicaciones para la distribución de tierra, los ingresos agropecuarios, y la presión para deforestar.

[7] Jemio y Andersen (2009) usa un Modelo de Equilibrio General Computable para desarrollar un escenario base para la economía boliviana hasta 2100. El escenario base indica que el PIB per cápita aumentaría aproximadamente 9 veces hasta el 2100. Esto corresponde a una tasa de crecimiento promedio del PIB real de 3% por año.

Gráfico 10: Proyecciones de población rural/urbana en Bolivia, 2001-2100 (número de personas)



Fuente: Elaboración propia, en base a proyecciones de población de CEPAL.

4.3. Proyecciones de empleo

De los 3,8 millones de personas miembros de la población económicamente activa ocupada en Bolivia en el año 2000, se estima que el 34% se emplea en el sector agropecuario, es decir aproximadamente 1,3 millones de personas.

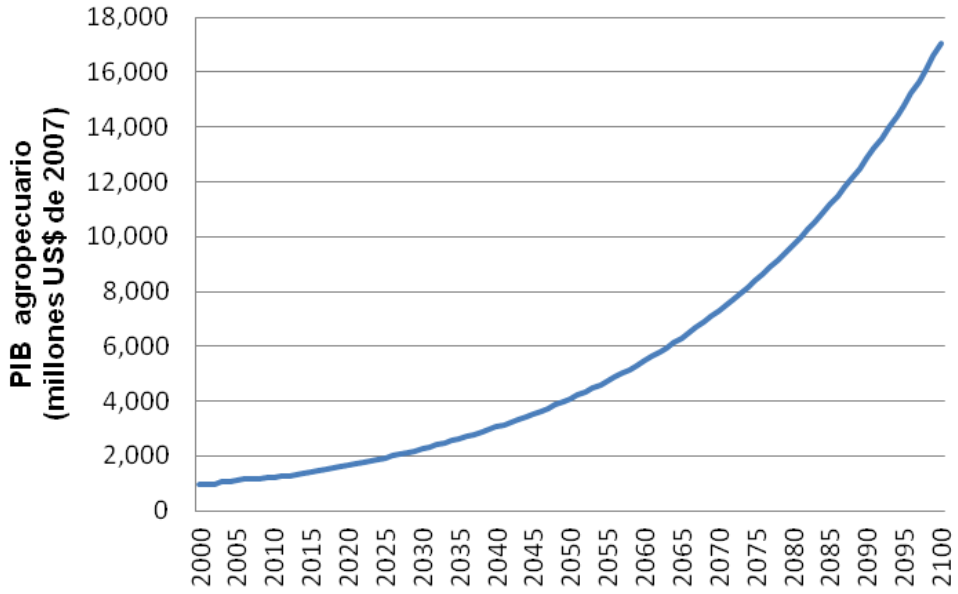
Según estimaciones realizadas a partir del modelo de equilibrio general BOLIXXI y las proyecciones de población, se espera que para el año 2050 se empleen unos 2,2 millones de personas en el sector agropecuario, pero que este número baje hasta 1,4 millones en 2100. Es decir, el porcentaje de la población que trabaja en el sector agropecuario bajaría desde 34% al principio del siglo hasta 18% al final del siglo.

4.4. Proyecciones de PIB agropecuario

Aunque el porcentaje de la población que se dedica a agricultura y ganadería decrece en el tiempo, el modelo BOLIXXI supone que la importancia del sector agropecuario dentro del PIB se mantiene relativamente estable, decreciendo de 9,2% del PIB en 2000 hasta 8,3% del PIB el año 2100; esto bajo el supuesto que la abundancia de tierra en Bolivia brinda ventajas comparativas a este sector. Este supuesto probablemente implica una exageración del tamaño del sector agropecuario al final del siglo, ya que la tendencia de la participación del sector agropecuario en el PIB normalmente decrece de manera más rápida a medida que los países vuelvan más ricos. Sin embargo, hacemos este supuesto conservador para asegurar que no se subestiman los impactos del cambio climático en el sector más vulnerable a variaciones climáticas. Bajo este supuesto del modelo de equilibrio general, el tamaño absoluto del sector se multiplicaría 18 veces (en términos reales) durante el siglo XXI (ver el Gráfico 11). Esto implica una tasa de crecimiento promedio del sector de 2,9% por año, muy similar a la tasa de crecimiento promedio del sector durante los últimos 24 años, lo cual era

de 2,8% por año, según datos de INE. Durante el mismo periodo, el sector de agricultura industrial ha crecido a una tasa promedio de 6,5%.

Gráfico 11: PIB agropecuario 2000-2100

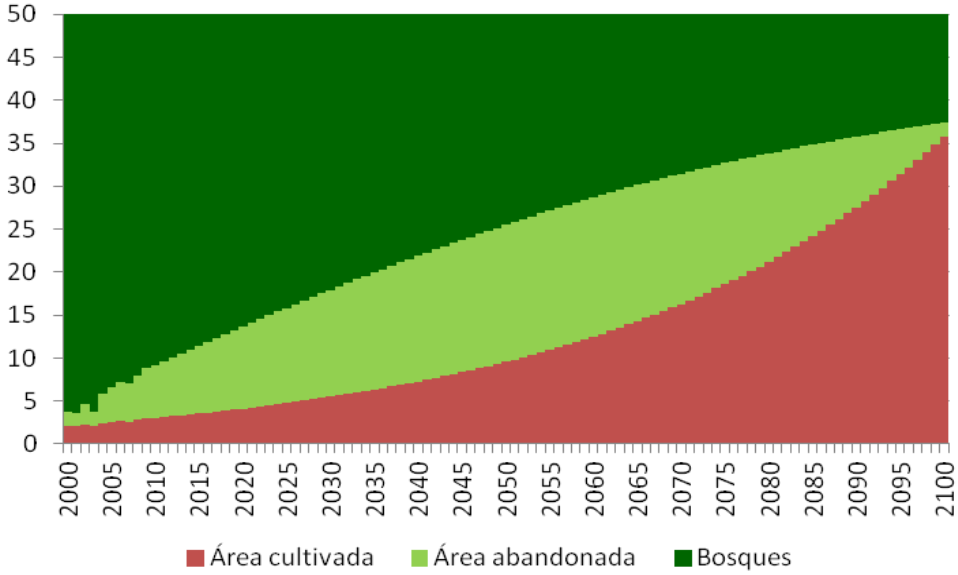


Fuente: Elaboración propia en base a estimaciones del modelo BOLIXXI

4.5. Proyecciones de área deforestada y área cultivada

En el estudio sectorial sobre biodiversidad que forma parte del estudio ERECC-Bolivia se hizo una proyección de la deforestación en Bolivia para el escenario base (Andersen, 2014). Se espera que, en la ausencia de cambios en la política de expansión de la frontera agropecuaria, el nivel de deforestación aumente de aproximadamente 10 millones hectáreas ahora hasta 37 millones hectáreas al final del siglo, así dejando solamente 13 millones hectáreas de bosque primaria en Bolivia. Este escenario esta reproducido en el Gráfico 12 abajo. Para el presente estudio se necesita saber además el área cultivada. De acuerdo con el modelo BOLIXXI, esta área crece exponencialmente con una tasa promedio anual de 2,9%, igual que el PIB agropecuario. La diferencia entre las dos curvas representa el área abandonado, o en descanso. Esta área está creciendo rápidamente en Bolivia estos años, por el fácil acceso a tierras boscosas que puedan ser deforestadas a bajo costo, utilizando el valor de la madera en pie como pago para el trabajo de deforestación. Sin embargo, hacia mediados del siglo, el acceso a bosque plano y accesible se vuelve más restringido, y los agricultores tendrán que reutilizar tierras que estaban en descanso. Hasta el fin del siglo, no va a haber escases de tierra, lo que permita expansión exponencial de la superficie cultivado sin obligar a los agricultores intensificar y mejorar rendimientos. De acuerdo con las proyecciones de Andersen (2014) recién en el próximo siglo se experimentara escasez de tierra lo que obligara a los agricultores a cambiar tecnologías.

Gráfico 12: Área cultivada, abandonada y bosque remanente (millones de hectáreas), 2000-2100



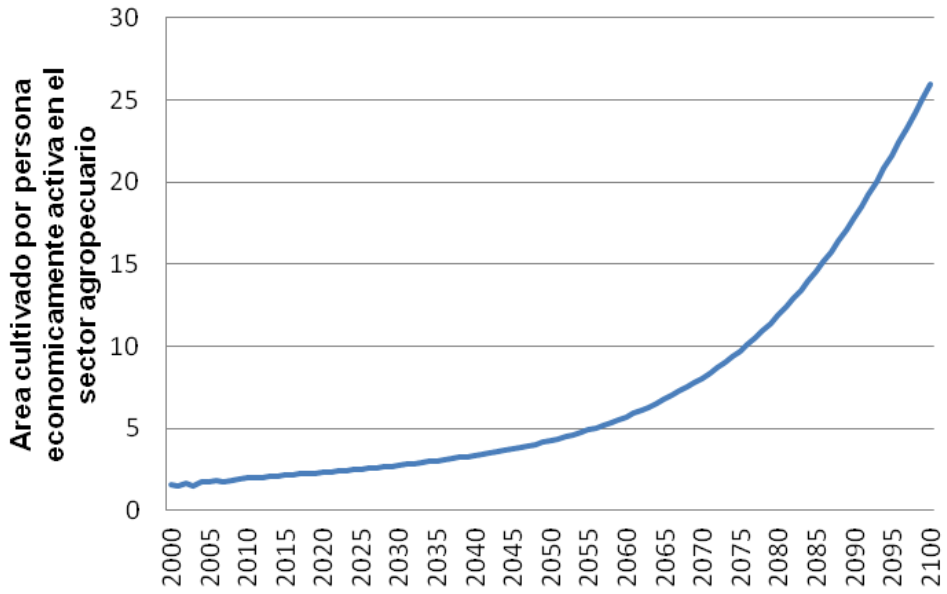
Fuente: Elaboración propia en base a estimaciones del modelo BOLIXXI

Estas proyecciones implican un aumento leve en el PIB agropecuario por hectárea cultivada, de $475/ha en 2000 hasta $621/ha en 2100, en términos reales. El aumento en PIB agropecuario por hectárea deforestada es mayor, desde $290/ha en 2000 hasta $477/ha en 2100.

Tierra cultivada por persona

Un factor muy importante para el nivel de ingresos en el sector agropecuario es la cantidad de tierra cultivado por persona. Dado que la población económicamente activa en el sector agropecuario crecerá muy poco durante este siglo, mientras que la tierra cultivada crece exponencialmente, se puede calcular que la tierra cultivada por persona aumente dramáticamente, desde 1,6 hectáreas por persona en 2000 hasta 26 hectáreas por persona en 2100 (ver el Gráfico 13).

Gráfico 13: Superficie cultivada por PEA agropecuaria 2000-2100



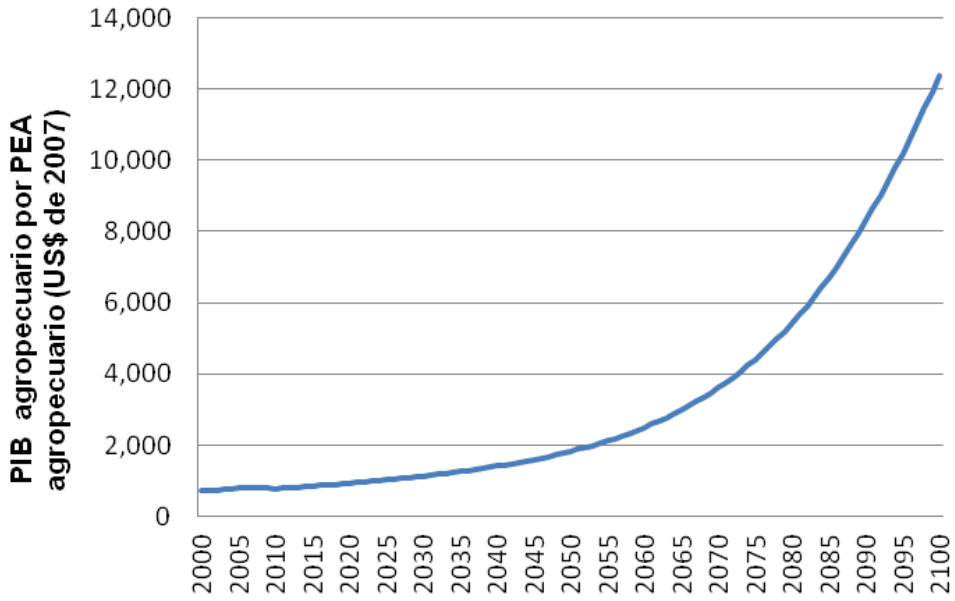
Fuente: Elaboración propia en base a estimaciones del modelo BOLIXXI

4.6. Valor agregado por trabajador

Finalmente, dado el gran aumento en superficie cultivado por persona y el leve aumento en rendimientos por hectárea, se puede inferir que el PIB agropecuario por persona económicamente activa en este sector va a aumentar dramáticamente. El Gráfico 14 muestra que el PIB por persona en el sector agropecuario se multiplicaría 17 veces durante el siglo XXI, desde solamente US$ 720 en 2000 hasta US$ 12.380 en 2100.

En comparación, el PIB por persona en todo el resto de la economía solamente va a aumentar 8 veces desde US$ 3.678 en 2000 hasta US$ 30.809 en 2100. Esta diferencia en tasas de crecimiento implica que se reduzca gradualmente la brecha entre ingresos agropecuarios e ingresos en los otros sectores. Sin embargo, al final del siglo la población que trabaja en el sector agropecuario todavía gana solamente 40% de lo que gana en promedio la población en el resto de los sectores.

Gráfico 14: PIB agropecuario por persona, 2000-2100



Fuente: Elaboración propia en base a estimaciones del modelo BOLIXXI.

Ya establecido un escenario base para el sector, podemos seguir con las simulaciones de los impactos del cambio climático esperado.

5. Simulación de impactos directos del cambio climático sobre el sector agropecuario

En esta sección simulamos los impactos del cambio climático previstos por el modelo PRECIS en los escenarios A2 y B2 como resumido en Mapas 1 y 2. Usamos las relaciones empíricas estimados entre clima y desempeño rural de la Sección 3. En todo la sección estimamos los impactos al final del siglo, es decir después de 110 años de cambio climático (diferencia entre los promedios de 1961-1990 y 2071-2100). Después, en la sección 6 estimamos los impactos cada año entre 2000 y 2100 y los introducimos en un modelo de equilibrio general computable para poder estimar los efectos indirectos y acumulados del cambio climático.
Para poder comparar con otros estudios que frecuentemente incorporan solo uno o dos de los impactos, presentamos las simulaciones secuencialmente, incorporando más y más impactos. Empezamos con los efectos brutos iniciales.

5.1. Simulación de los efectos brutos iniciales del cambio climático

Los efectos brutos iniciales del cambio climático son los efectos directos de cambios en temperatura y precipitación sobre los rendimientos de los cultivos actualmente producidos en cada región. Típicamente los cultivos están seleccionados por ser adecuados para el clima predominante en cada lugar. Por eso, es probable que los rendimientos actuales se encuentren cerca del óptimo, y cualquier cambio en el clima, reduciría los rendimientos. Sin embargo, también hay lugares donde el clima actual está tan alejado del óptimo para cualquier cultivo, que cambios climáticos podrían causar mejoras en los rendimientos.

En este estudio se ha estimado el efecto bruto inicial a partir de los efectos netos (con sustitución de cultivos – ver la siguiente sub-sección) aumentando los potenciales beneficios de sustitución de cultivos en cada municipio. La metodología esta explicada en detalle en el Anexo A.

El Cuadro 5 resume los resultados de la simulación a nivel departamental y nacional de los efectos brutos iniciales del cambio climático, manteniendo los demás factores constantes de acuerdo al escenario de referencia descrito en la anterior sección. En el escenario A2, el más extremo, los efectos brutos del cambio climático sería una reducción en los ingresos rurales del 20% a nivel nacional. El efecto más fuerte proviene de los efectos de cambios en temperatura (representan una pérdida en promedio a nivel nacional de US$109, mientras que las pérdidas por precipitación significan US$18, en promedio).

Según estas estimaciones todos los departamentos pierden, aunque algunos más que otros. Los lugares ya calientes (Santa Cruz, Beni y Pando) pierdan mucho por aumentos en las temperaturas actualmente altas, mientras que los impactos por cambios en precipitación son mucho más diversos. Los departamentos de Santa Cruz y Oruro ganarían por aumentos en precipitación en áreas que actualmente tienen escasez de precipitación para agricultura, mientras que Pando perdería por recibir aún más precipitación en una región actualmente muy húmeda.

Cuadro 5: Impactos brutos iniciales del cambio climático del Escenario A2 sobre el nivel de ingresos rurales per cápita, por departamento y vía de impacto en el año 2100 (sin tomar en cuenta todavía los efectos por sustitución de cultivos, fertilización de CO2 , efectos de eventos climáticos extremos, desertificación y cambios en disponibilidad de agua para riego)

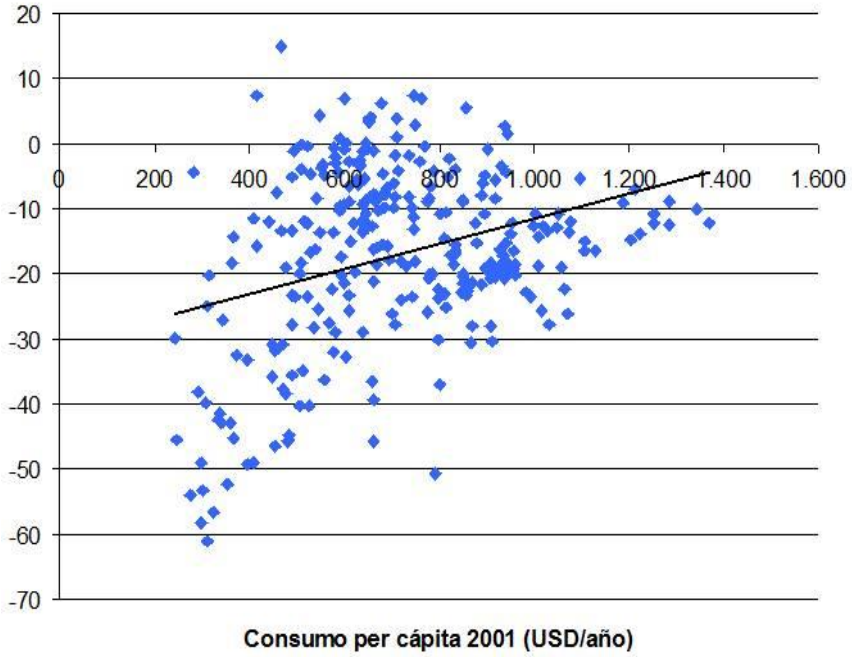
Departamento	Por cambio en temperatura (US$/persona/ año)	Por cambio en precipitación (US$/persona/ año)	Impacto bruto inicial total (US$/persona/año)	Impacto bruto inicial total (%)
Beni	-198	-27	-225	-26
Chuquisaca	-108	-45	-153	-28
Cochabamba	-111	-48	-159	-26
La Paz	-58	-9	-67	-8
Oruro	-57	+7	-49	-7
Pando	-152	-30	-182	-20
Potosí	-88	-48	-136	-34
Santa Cruz	-204	+36	-168	-18
Tarija	-130	-40	-170	-20
Bolivia	-109	-18	-127	-20

Fuente: Estimación propia.

Nota: Promedios ponderados por la población municipal de 2001. Solamente municipios 50%-100% rurales incluidos.

Estas pérdidas pueden significar hasta 61% del ingreso per cápita en el municipio de Tacobamba, 58% en el municipio de Ravelo, 56% en Arampampa, 54% en Tinquipaya y 53% en Ocurí, todos estos en el departamento de Potosí. En general, los municipios inicialmente más pobres, pierdan mayores partes de sus ingresos que los municipios inicialmente más ricos (ver el Grafico 15).

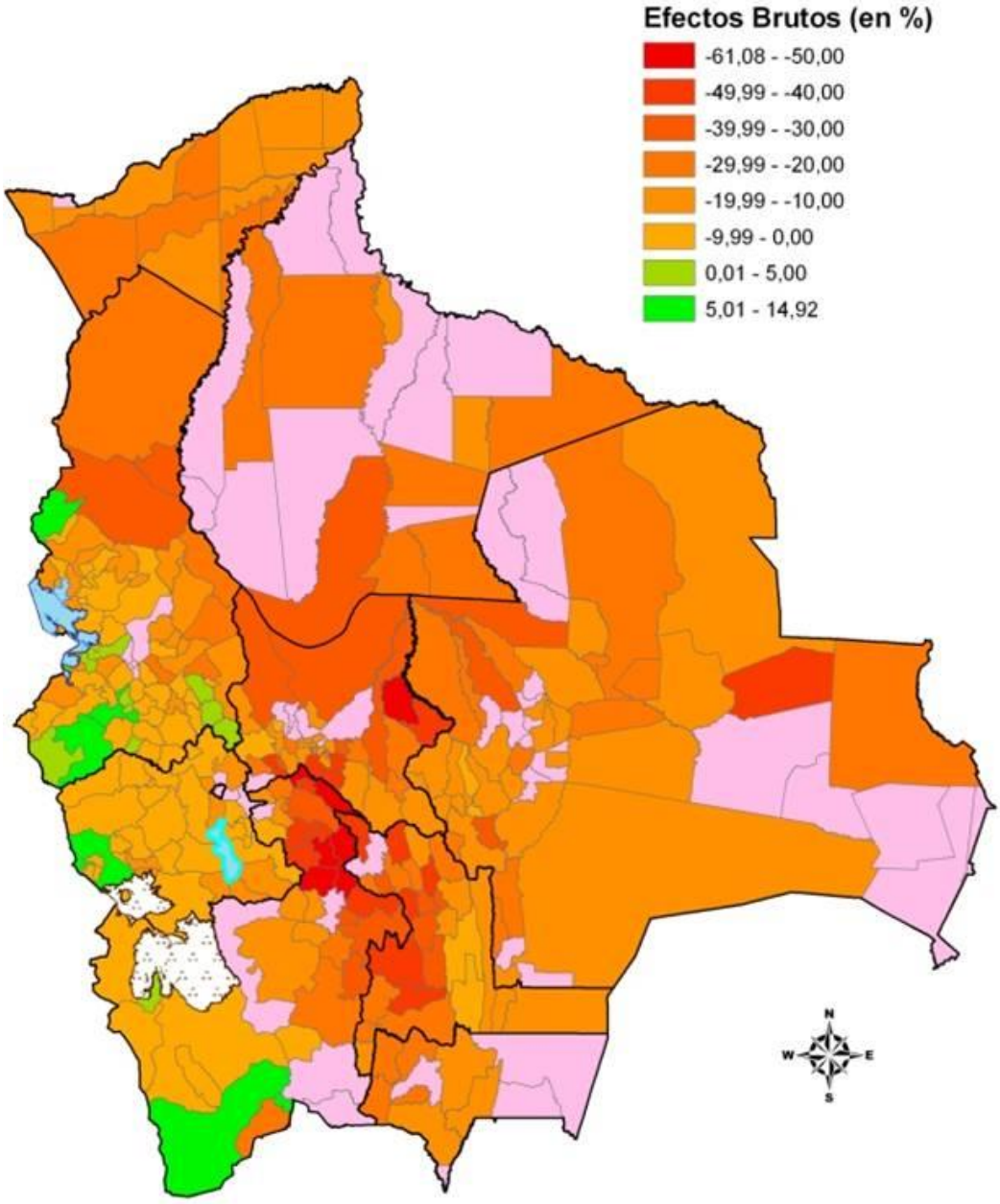
Gráfico 15: Impactos brutos iniciales del cambio climático en el escenario A2 en 2100 sobre ingresos rurales per cápita, por municipio (en porcentaje)



Fuente: Elaboración propia.

En el Mapa 4 se puede observar los efectos brutos iniciales del cambio climático estimado en el escenario A2 para el año 2100, casi todas las regiones pierden con excepción de algunos municipios al noreste de Oruro que se beneficiarían por mayores temperaturas y mayores niveles de precipitación.

Mapa 4: Impactos brutos iniciales del cambio climático entre 1961-1990 y 2071-2100 en el escenario A2 sobre ingresos rurales, por municipio (en porcentaje)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los municipios color rosado tienen la mayoridad de su población en áreas urbanas, y por eso son excluidas del análisis.

5.2. Simulación de los efectos netos considerando la posibilidad de sustitución de cultivos.

Nada obliga a generación tras generación de agricultores a seguir sembrando exactamente los mismos cultivos, especialmente cuando el clima y muchos otros factores están cambiando.

Aunque el sector agropecuario es uno de los sectores más afectados por el cambio climático, también es considerado como uno de los sectores que más fácilmente puede adaptarse (Mendelsohn et al., 2000). Considerando que el capital utilizado en la producción agropecuaria tiene un tiempo de vida corto (5 a 10 años), un productor agropecuario puede cambiar entre 10 y 20 veces su capital de trabajo en el periodo analizado (100 años), por lo que es razonable esperar que los productores agropecuarios tengan muchas más oportunidades de reemplazar su capital de trabajo y sus prácticas de producción que otros sectores (Mendelsohn, 2000).

Por esto motivo, varios autores (Mendelsohn et al., 2000; Seo & Mendelsohn, 2007; Seo & Mendelsohn, 2008; Kurukulasuriya & Mendelsohn, 2008; Seo et al., 2008) señalan la importancia de considerar dentro de los análisis de los efectos del cambio climático, la adaptación, dado que está reduciría enormemente los daños producidos por el cambio climático.

En esta sub-sección simulamos los efectos netos del cambio climático, permitiendo que los agricultores substituyen cultivos por los que son más apropiados para el clima en cada momento y cada lugar, evitando así el síndrome "del granjero tonto."[8] Se logra esto al usar la relación entre clima e ingresos rurales por persona en vez de la productividad física de los cultivos, porque al usar ingresos ya se incluye el efecto de la adaptación hacia los cultivos y métodos más adecuados para un clima dado. Estas relaciones empíricas también toman en cuenta que no todos los ingresos rurales provienen de actividades vulnerables al clima. De acuerdo a la matriz de contabilidad social, que forma parte del modelo de equilibrio general computable usado por este proyecto, solamente el 80% de los ingresos rurales provienen de actividades agropecuarias y silvícolas y 59% de actividades agrícolas.

En esta sub-sección se considerado una adaptación espontanea sin costos significativos. Simplemente consiste en el cambio a cultivos más apropiados para el nuevo clima. Solamente se incluye cultivos ya conocidos, así que esta adaptación espontanea no incluye el desarrollo de nuevas semillas diseñadas para ser más resilientes a un clima más adverso, ni inversiones por encima de lo usual. Este tipo de adaptación se ve constantemente en respuesta a cambios en demanda y precios de productos agropecuarios, así que es natural suponer que también va a ocurrir en el caso de cambio climático.

Bajo este supuesto, los impactos del cambio climático ya no son tan adversos. En un clima más caliente, los agricultores del Altiplano van a poder introducir otros cultivos más lucrativos, lo que significa que los impactos netos para La Paz y Oruro se vuelven levemente positivos en vez de negativos. En cambio, en los lugares actualmente muy calientes, como Pando, no existe la posibilidad de sustitución, dado que están usando los cultivos más aptos para el clima más caliente. El Cuadro 6 muestra los efectos netos a nivel departamental. El efecto total ya no es una pérdida de 20% de los ingresos rurales sino una pérdida de 5%. El departamento de Potosí, en el Altiplano, se beneficia del aumento en temperaturas, pero pierda más por reducciones en precipitación, así que el efecto neto sobre este departamento más pobre de Bolivia sería una reducción en

[8] Traducción del inglés "dumb farmer syndrome" (Mendelsohn et al., 2000).

ingresos per cápita en municipios rurales de 7%. Beni, de las tierras bajas, es el departamento que se quedaría con mayores pérdidas, con una reducción en sus ingresos rurales per cápita de 20%.

Cuadro 6: Impactos netos del cambio climático sobre ingresos rurales en 2100 en el Escenario A2, por departamento y vía de impacto
(tomando en cuenta la posibilidad de sustitución de cultivos pero sin tomar en cuenta la fertilización de CO2, eventos extremos, desertificación y cambios en disponibilidad de riego)

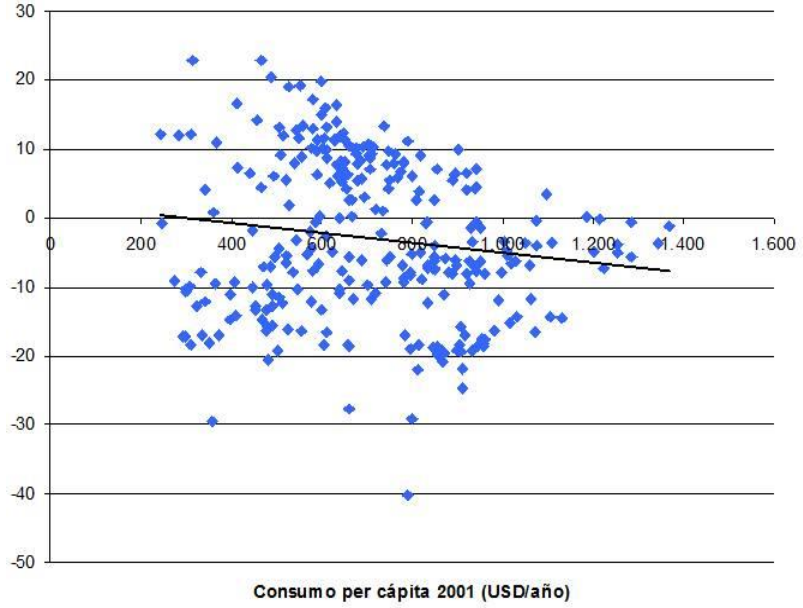
Departamento	Por cambio en temperatura (US$/persona/año)	Por cambio en precipitación (US$/persona/año)	Impacto total (US$/persona/año)	Impacto total (%)
Beni	-144	-33	-178	-20
Chuquisaca	-35	-36	-71	-13
Cochabamba	-37	-34	-72	-10
La Paz	20	-7	13	+2
Oruro	54	9	63	+10
Pando	-162	-8	-170	-18
Potosí	15	-38	-23	-7
Santa Cruz	-98	31	-66	-7
Tarija	-35	-31	-66	-8
Bolivia	-23	-13	-36	-5

Fuente: Estimación propia.

Nota: Promedios ponderados por la población municipal de 2001. Solamente municipios 50%-100% rurales incluídos.

El Gráfico 16 muestra el impacto neto del cambio climático (medido como cambio porcentual en el nivel ingresos) en todos los municipios rurales de Bolivia contra su nivel inicial de ingresos per cápita. Los impactos ya son mucho más variados con ganancias de 10-20% en muchos municipios, pero también pérdidas del mismo tamaño en muchos otros. Entre los municipios actualmente más ricos, dominan las pérdidas, mientras que en los municipios más pobres hay ganadores y perdedores, de acuerdo con esta simulación.

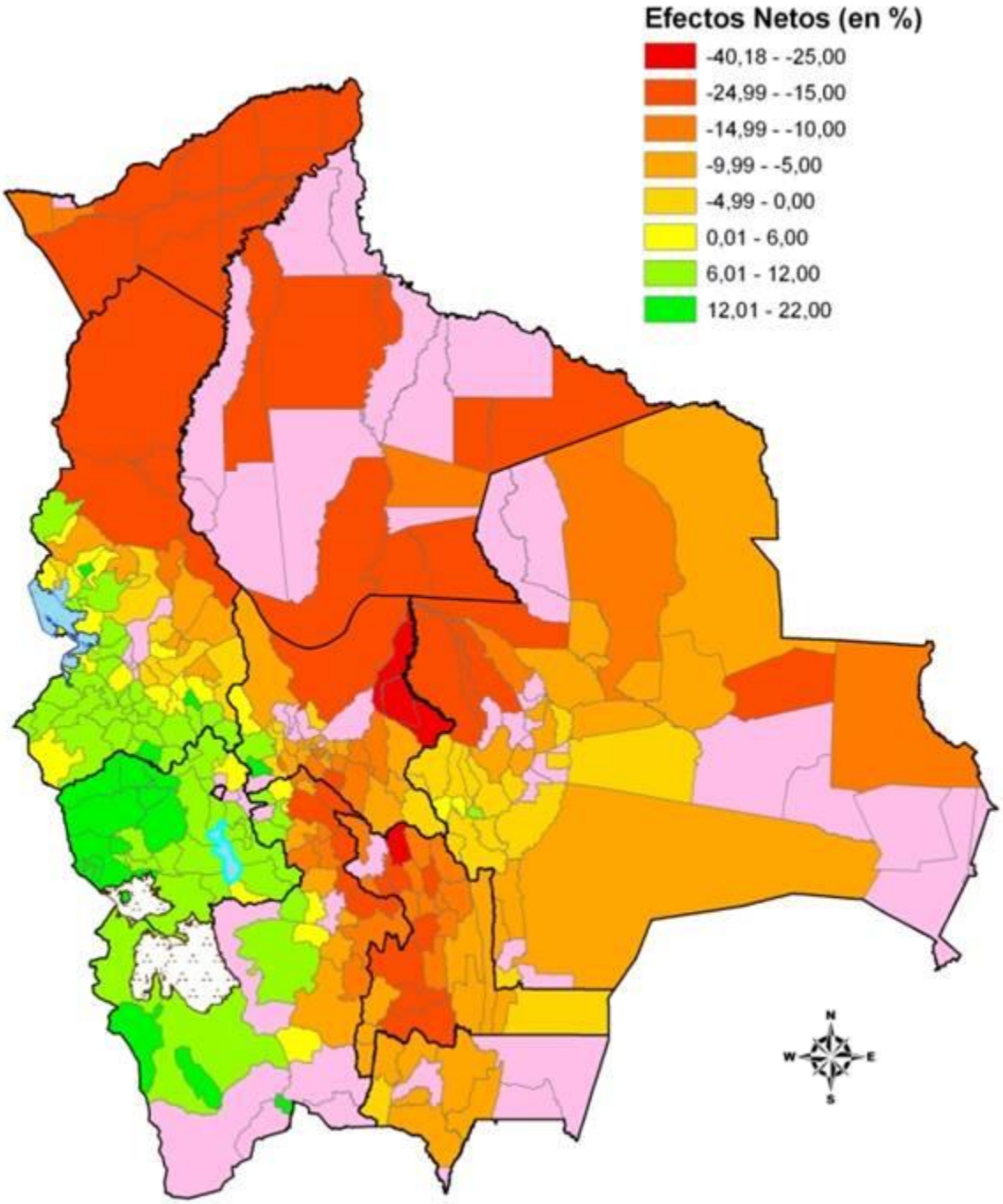
Gráfico 16: Impactos netos del cambio climático en el escenario A2 en 2100 sobre ingresos rurales per cápita, por municipio (en porcentaje)



Fuente: Elaboración propia.

El Mapa 5 muestra los mismos resultados de manera geográfica.

Mapa 5: Impactos netos del cambio climático en el escenario A2 en 2100 sobre ingresos rurales per cápita, por municipio (en porcentaje)



Fuente: Elaboración propia.

Inclusión de los beneficios de la fertilización de CO2 en los impactos del cambio climático

El efecto de fertilización de CO_2 es positivo en todo el país, pero como fue argumentado en la sección 3.2, el efecto es mayor para cultivos C4, como soya, que para cultivos C3, como maíz. Para distribuir los efectos geográficamente, suponemos que todos los municipios con niveles de precipitación mayor a 100 cm/año aprovechan la humedad para cultivar plantas C3 (como la soya) y por eso tendrán un aumento en rendimientos de 27% en 2100; mientras que los municipios con menor precipitación tienen que usar plantas C4 (como maíz) y solamente tienen un aumento en rendimientos del 20% en 2100.

Tomando en cuenta que solamente el 59% de los ingresos rurales provienen de actividades agrícolas[9], y por ende, no todos los ingresos rurales se verán afectados por el efecto de fertilización de CO_2, calculamos un efecto positivo promedio sobre ingresos rurales del 11%. Es decir, desde un efecto bruto inicial del cambio climático de -20%, pasando por un efecto neto de -5%, ahora tenemos un efecto de +6% sobre los ingresos rurales. El efecto es levemente más positivo para los departamentos húmedas de tierras bajas que para los departamentos secos de tierras altas. Sin embargo, las diferencias no son muy grandes (ver el Cuadro 7).

Cuadro 7: Impactos parciales del cambio climático del Escenario A2 el año 2100 sobre el nivel de ingresos rurales per cápita, por departamento (% de cambio de ingresos rurales per cápita)

Departamento	Efecto brutos iniciales de cambios en temperatura y precipitación	Efectos netos considerando la posibilidad de sustitución de cultivos	Efecto neto considerando la fertilización de CO_2
Beni	-26	-20	-7
Chuquisaca	-28	-13	-3
Cochabamba	-26	-10	+1
La Paz	-8	+2	+12
Oruro	-7	+10	+19
Pando	-20	-18	-5
Potosí	-34	-7	+3
Santa Cruz	-18	-7	+5
Tarija	-20	-8	+2
Bolivia	-20	-5	+6

Fuente: Estimación propia.

La mayoría de estudios acerca de los impactos del cambio climático sobre el sector agropecuario no incluye más efectos que estos tres. Nuestros resultados son similares a los de Parry et al. (2004) quienes encuentran un cambio en rendimientos de los cultivos de -10 a -30% si no se toma en cuenta la fertilización de CO_2, y de 0 a 2,5% cuando se toma en cuenta la fertilización de CO_2. Sin embargo, a continuación incluimos tres tipos de impactos adicionales, que van a hacer que los impactos se vuelvan negativos otra vez.

[9] De acuerdo a la matriz de contabilidad social usado en el modelo de equilibrio general computable usado en el proyecto.

Inclusión de los impactos adversos del aumento en eventos extremos

Los impactos del aumento en la frecuencia y severidad de eventos extremos (inundaciones) fueron estimados por Arenas (2014) y reportados en el Cuadro 3. Estos impactos sobre el PIB son transformados[10] a impactos sobre ingresos rurales para que sean comparables con los otros impactos reportados en el Cuadro 8. Los eventos extremos afectan sobre todo los departamentos de Beni y Santa Cruz, los cuales experimentarían inundaciones destructivas casi todos los años de acuerdo al modelo PRECIS.

Cuadro 8: Impactos parciales del cambio climático del Escenario A2 el año 2100 sobre el nivel de ingresos rurales per cápita, por departamento (% de cambio de ingresos rurales per cápita)

Departamento	Efecto brutos iniciales de cambios en temperatura y precipitación	Efectos netos considerando la posibilidad de sustitución de cultivos	Efecto neto considerando la fertilización de CO_2	Efecto neto considerando el impacto de desastres naturales
Beni	-26	-20	-7	-64
Chuquisaca	-28	-13	-3	-13
Cochabamba	-26	-10	+1	-5
La Paz	-8	+2	+12	+10
Oruro	-7	+10	+19	+19
Pando	-20	-18	-5	-5
Potosí	-34	-7	+3	+3
Santa Cruz	-18	-7	+5	-18
Tarija	-20	-8	+2	+2
Bolivia	-20	-5	+6	-5

Fuente: Estimación propia.

Con estos efectos adversos, los impactos a nivel nacional llegan a una reducción del 5% de los ingresos rurales, sin embargo con enormes variaciones, desde una reducción de casi dos tercios en Beni hasta un efecto positivo de 19% en Oruro que normalmente no es afectado por las precipitaciones fuertes, pero que mejoraría con un aumento en temperaturas y precipitación.

5.3. Inclusión de los impactos de cambios en biodiversidad

Como fue mostrado en la sección 3.5, el estudio de Andersen (2014) encuentra que el cambio climático ocasionaría un fuerte proceso de desertificación en el Altiplano pero un leve aumento en el nivel de biodiversidad en las tierras bajas. La desertificación en el altiplano afectaría sobre todo a las familias que dependen del pastoreo de llamas, alpacas y ovejas, porque va a ser mucho más difícil para estos encontrar vegetación natural para su alimentación. En el departamento de Potosí, el 94% de las familias rurales están con actividades ganaderas[11], así que niveles de desertificación tan dramáticos como mostrados en el Mapa 3

[10] De acuerdo con el modelo de equilibrio general computable usado para el proyecto, al final del siglo los ingresos rurales constituyen aproximadamente 11% del PIB.

[11] De acuerdo a la Encuesta Continua de Hogares, 2003-2004 de INE.

tendría un efecto adverso muy importante sobre estas familias, especialmente porque no existen muchas oportunidades alternas en esta región.

Convertimos el impacto total de 0,9% del PIB encontrado en Andersen (2014) a un impacto de 8% de los ingresos rurales, tomando en cuenta que los ingresos rurales constituirán el 11% del PIB el año 2100 (de acuerdo al escenario base desarrollado con el modelo de equilibrio general computable).

Cuadro 9: Impactos parciales del cambio climático del Escenario A2 el año 2100 sobre el nivel de ingresos rurales per cápita, por departamento
(% de cambio de ingresos rurales per cápita)

Departamento	Efecto neto considerando el impacto de desastres naturales	Impactos económicos de los cambios en el nivel de biodiversidad	Efecto neto considerando los cambios en la biodiversidad
Beni	-64	+3	-61
Chuquisaca	-13	-26	-39
Cochabamba	-5	-11	-16
La Paz	+10	-8	+2
Oruro	+19	-17	+2
Pando	-5	+1	-4
Potosí	+3	-44	-41
Santa Cruz	-18	+10	-8
Tarija	+2	-9	-7
Bolivia	-5	-8	-13

Fuente: Estimación propia.

El Cuadro 9 muestra que los impactos de cambios en los niveles de biodiversidad tendrán efectos variados, desde una reducción de 44% de los ingresos rurales en Potosí hasta un aumento de 10% en Santa Cruz.

5.4. Inclusión de los impactos de cambios en la disponibilidad de agua para riego

El último efecto directo del cambio climático sobre el sector agropecuario que vamos a incluir en este estudio, es el efecto de cambios en la disponibilidad de agua para riego. Estos costos fueron estimados en Calvo (2014). Este estudio analiza los cambios en oferta hídrica causados por el cambio climático y los compara con la proyección de demanda para determinar donde se genera escasez de agua al final del siglo. Después calcula los cambios en la oferta neta en todos los lugares con niveles de escasez media (cambios en disponibilidad de agua no son importantes si no hay escasez) y encuentra una reducción relevante en la disponibilidad de agua de 6.089 Hm^3. El Cuadro 10 presenta los resultados de Calvo (2014), indicando un impacto adverso por perdida de agua de 0,31% del PIB al final del siglo.

Cuadro 10: Impactos del cambio climático (A2) sobre la oferta neta de agua al 2100

Departamento	Cambio en oferta neta (Hm^3)	Costo del cambio en oferta hídrica (millones de dólares de 2007)	Costo del cambio en oferta hídrica (% del PIB del 2100)
Beni	-15	2	0,00
Chuquisaca	-1.640	174	0,08
Cochabamba	-1.588	169	0,08
La Paz	-5	0	0,00
Oruro	-448	48	0,02
Pando	-27	3	0,00
Potosí	-1.661	176	0,08
Santa Cruz	425	-45	-0,02
Tarija	-1.129	120	0,06
Bolivia	-6.089	646	0,31

Fuente: Calvo (2014).

Nota: Solamente provincias con un Índice de Escasez mayor a 20% son contabilizados.

Aproximadamente 90% del agua se usa para riego y solamente 10% para las necesidades del resto de la economía. Entonces, convertimos 90% de los costos en la última columna a impactos sobre ingresos rurales para poder incluir estos efectos en el análisis sobre los efectos directos del cambio climático sobre el sector agropecuario (ver el Cuadro 11).

Cuadro 11: Impactos directos totales del cambio climático del Escenario A2 el año 2100 sobre el nivel de ingresos rurales per cápita, por departamento (% de cambio de ingresos rurales per cápita)

Departamento	Efecto neto considerando los cambios en la biodiversidad	Impactos económicos de los cambios en disponibilidad de agua para riego	Efecto final considerando los efectos de perdida de riego
Beni	-61	0	-61
Chuquisaca	-39	-13	-51
Cochabamba	-16	-4	-20
La Paz	+2	0	+2
Oruro	+2	-3	-2
Pando	-4	-1	-5
Potosí	-41	-15	-56
Santa Cruz	-8	+1	-7
Tarija	-7	-9	-17
Bolivia	-13	-3	-16

Fuente: Estimación propia.

La última columna del Cuadro 11 presenta los impactos directos totales considerando todos los efectos directos del cambio climático sobre el sector agropecuario.

Con todos estos impactos sobre el sector agropecuario, llegamos a un impacto adverso directo que implicaría una reducción en ingresos rurales de 16% en promedio a nivel nacional, pero hasta 61% de pérdida en Beni, 56% en Potosí y 51% en Chuquisaca. Solo el departamento de La Paz saldría beneficiado por los impactos directos cambio climático, con un aumento muy modesto de 2% en los ingresos rurales.

Sin embargo, estos solamente son los impactos directos en un año (2100). En la siguiente sección estimamos los impactos indirectos y dinámicos también, para obtener un panorama más completa sobre los impactos del cambio climático sobre el sector agropecuario durante todo el siglo XXI.

6. Simulación de impactos totales (directos, indirectos y dinámicos) del cambio climático sobre el sector agropecuario

Los impactos directos totales reportados en el Cuadro 11 incluyen mucho más efectos que otros estudios sobre cambio climático en el sector agropecuario normalmente logran incluir. Sin embargo, no cuentan toda la historia. En vez de reportar impactos solamente el último año del siglo, calculamos los efectos directos cada año y estos shocks introducimos en un modelo de equilibrio general computable para ver los efectos indirectos y dinámicos también.

Esto es importante porque en una economía todo está vinculado. Lo que pasa en el sector agropecuario va a tener efectos sobre los otros sectores, y lo que pasa en los otros sectores va a afectar el sector agropecuario. Además, lo que pasa en un año va a afectar la situación en todos los años subsecuentes.

El trabajo de integración de todos los impactos sectoriales directos del proyecto ERECC-Bolivia fue descrito en Jemio et al. (2014). Aquí resumimos las partes más relevantes para el sector agropecuario.

Durante las anteriores secciones hemos descrito en detalle los resultados del escenario A2 (el más extremo). Como la metodología es exactamente lo mismo para el escenario B2, solamente con menores impactos, para ahorrar espacio no hemos reportado estos resultados. Sin embargo, desde ahora incluimos también los resultados para el escenario B2, los cuales en promedio son un poco menores de la mitad de los impactos encontrados para el escenario A2.

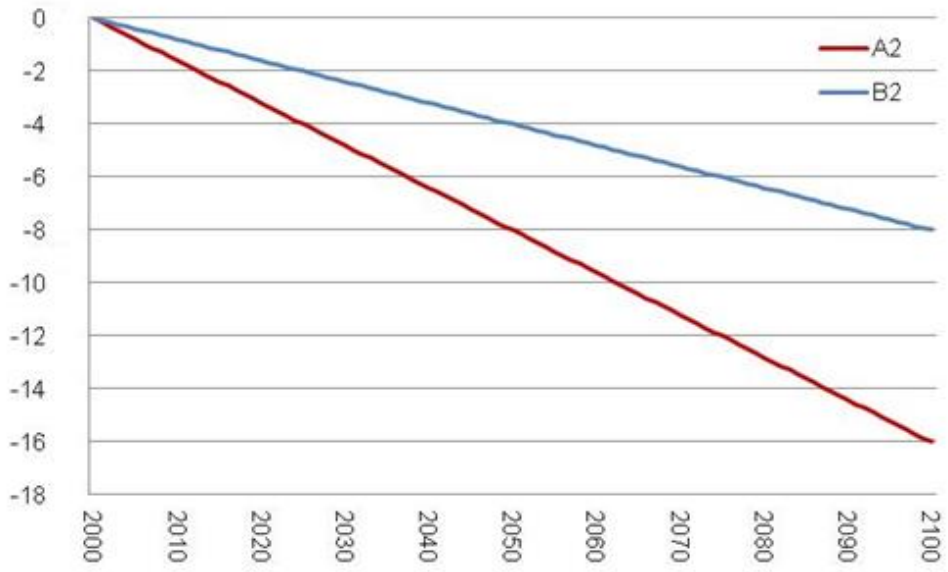
6.1. La trayectoria de impactos directos

Según las proyecciones de IPCC (2007), el aumento en temperaturas ocurriría de manera aproximadamente lineal entre el periodo base 1961-1990 y el periodo futuro 2071-2100. Para simplificar el análisis y hacerlo coincidir con nuestro escenario base, comprimimos el cambio esperado durante estos 110 años en los 100 años entre 2000 y 2100. Suponemos que en el año 2000, el clima está todavía dentro de lo “normal” pero a partir de 2001 empieza a cambiar linealmente hasta llegar a los cambios ilustrados en los Mapas 1 y 2. Esto es un supuesto simplificador que no introduce mucha distorsión en comparación con el gran nivel de incertidumbre que de todos modos existe sobre las proyecciones climáticas. Además, el clima “normal” cambia todo el tiempo, así que la asignación de 2000 como “normal” solamente es una convención práctica que nos ayuda a distinguir entre lo que ya conocemos y lo que nos espera en el futuro de acuerdo con el modelo PRECIS.

Bajo el supuesto que el clima era “normal” en 2000, no habría cambio climático en 2000, así que los impactos del cambio climático serian 0%. Para 2100 ya se han calculado impactos de -16% sobre los ingresos rurales en

la sección anterior. La pregunta es ¿que pasa todos los años entre estos dos extremos de la simulación? Dado que el clima cambia de manera aproximadamente lineal, se puede suponer que los impactos también crecen linealmente desde 0% en 2000 hasta 16% del consumo rural en 2100. Esto supone que el primer 0,1°C de aumento tendrá el mismo efecto porcentual sobre los ingresos que el último 0,1°C. No sabemos si esto es cierto. Se podría argumentar que la curva debería ser exponencial, significando que pequeños cambios de status quo no son muy graves, pero que en un mundo 4°C más caliente cualquier aumento adicional sería catastrófico. Pero también se podría argumentar que la curva debería ser logarítmica, bajo el supuesto que ahora Bolivia es relativamente pobre, con pocas capacidades de absorción de shocks y 0,1°C de aumento sería más grave ahora cuando somos pobres que en el futuro cuando el país sea más rico. Por la imposibilidad de saber la forma real de la curva, suponemos que es lineal (ver el Grafico 17).

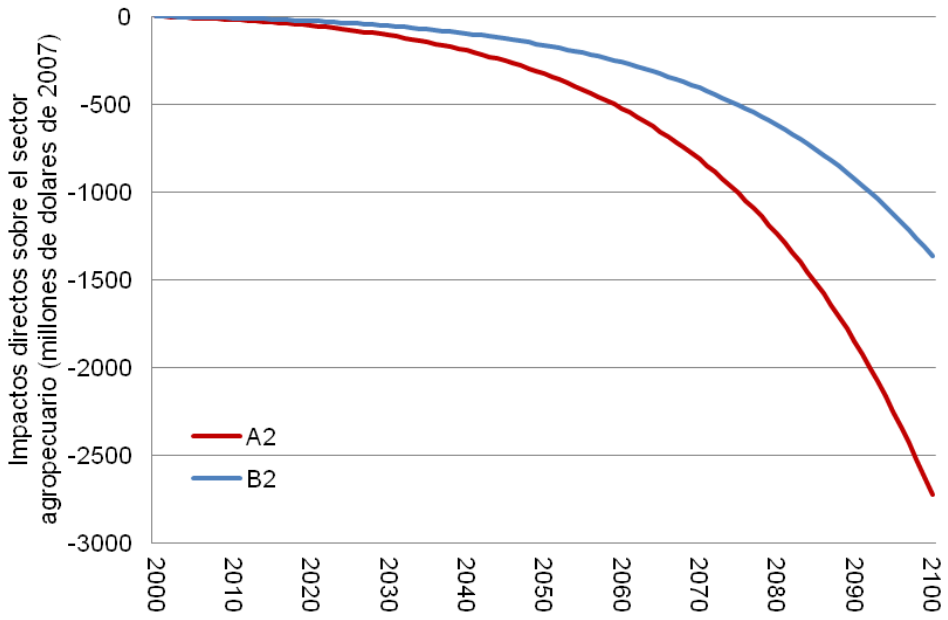
Gráfico 17: Impactos directos totales sobre el sector agropecuario, escenarios A2 y B2 (cambio porcentual en los ingresos rurales)



Fuente: Elaboración propia.

Multiplicando esta senda de porcentajes con la senda de PIB agropecuario (Cuadro 11) medido en dólares reales de 2007, podemos estimar los impactos directos totales en dólares cada año desde 2000 hasta 2100 en los dos escenarios (ver el Grafico 18). Dado el crecimiento exponencial del PIB agropecuario, los costos del cambio climático también crecerán exponencialmente. Se estima que para el año 2100 los costos directos del cambio climático sobre el sector agropecuario llegarían a 2.729 mil millones de US$ del 2007 en el escenario A2 y 1.365 millones de US$ de 2007 en el escenario B2.

Gráfico 18: Impactos directos totales sobre el sobre el sector agropecuario, escenarios A2 y B2 (millones de dólares de 2007)



Fuente: Elaboración propia.

Se puede calcular el valor neto presente de estas sendas de perdidas, para diferentes tasas de descuento. En el escenario A2, utilizando una tasa de descuento de 0,5% por año, llegamos a un valor neto presente de los impactos directos sobre el sector agropecuario de -44 mil millones de dólares reales de 2007. En el escenario B2 perdidas serian aproximadamente la mitad (ver el Cuadro 12).

Cuadro 12: Valor neto presente de los impactos directos del cambio climático sobre el sector agropecuario, para diferentes tasas de descuento (millones de dólares de 2007)

Escenario climático	0.5%	2%	4%	6%	12%
A2	-43.967	-14.250	-3.834	-1.322	-188
B2	-21.984	-7.125	-1.917	-661	-94

Fuente: Estimación propia.

6.2. Introducción de shocks en el modelo de equilibrio general computable

Para poder analizar los efectos indirectos y acumulados de los impactos adversos del cambio climático, Jemio et al. (2014) introducen los impactos directos sobre el sector agropecuario calculados en este estudio en un modelo de equilibrio general computable junto con los impactos directos encontrados para los otros sectores analizados.

El efecto neto de cambios en productividad agrícola considerando sustitución de cultivos y fertilización de CO_2 fue distribuido con dos tercios al sector de Agricultura Tradicional y un tercio al sector de Agricultura Industrial, reflejando su participación actual en el PIB agrícola.

El efecto de inundaciones más frecuentes fue asignado también a los sectores Agricultura Tradicional y Agricultura Moderna, mientras que el efecto de reducción de agua para riego fue asignado exclusivamente al sector de Agricultura Tradicional. El efecto de reducción de la biodiversidad debido al cambio climático fue distribuido entre los sectores Agricultura Tradicional, Ganadería y Silvicultura, Caza y Pesca, de acuerdo a sus contribuciones al PIB el año 2010. El efecto de reducción en la disponibilidad de agua para riego fue asignado exclusivamente al sector de Agricultura Tradicional. El Cuadro 13 resume la distribución de impactos en los diferentes sub-sectores del sector agropecuario.

Cuadro 13: Distribución de impactos directos dentro del sector agropecuario (2010-2100)

Sectores	VPN Pérdidas Producción (MM US$ de 2007)		VPN como % VPN PIB Sectorial escenario base	
	A2	B2	A2	B2
Agricultura Tradicional	26.431	11.501	8,76	3,81
Agricultura Industrial	12.633	8.730	12,51	8,65
Ganadería	4.429	1.231	3,72	1,03
Silvicultura, Caza y Pesca	1.265	352	3,38	0,94
Total sector agropecuario	44.758	21.814	6,77	3,30

Fuente: Jemio et al. (2014).

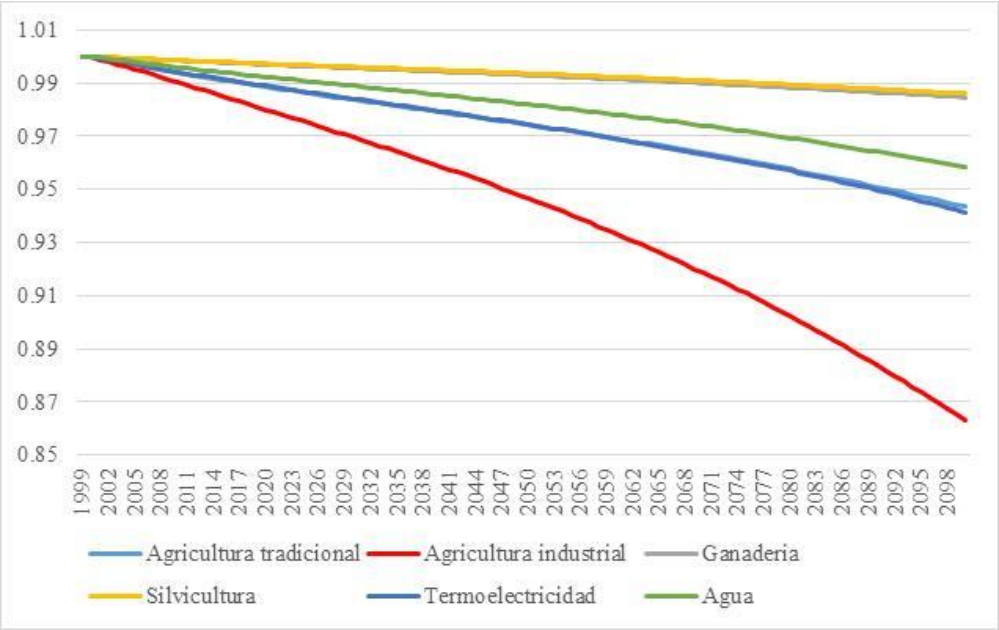
Nota: El Valor Presente está calculado usando una tasa de descuento de 0.5%.

Existen unas pequeñas discrepancias (menores de 2%) entre los totales del Cuadro 12 y Cuadro 13, porque se ha llegado a los números por diferentes rutas. Básicamente las discrepancias se deben al hecho de usar ingresos rurales como proxy del PIB agropecuario y por redondeo fuerte en los porcentajes en los cálculos de impactos directos en el presente estudio.

Jemio et al. (2014) explican que la forma en que estos shocks fueron hechos operacionales en el MEGC se basa en la propiedad de homogeneidad de las funciones de Elasticidad de Sustitución Constante (CES) utilizados como funciones de producción sectoriales en el MEGC. Es decir, que si cada uno de los diferentes factores de producción de la función CES es multiplicado por un factor λ, la producción total Q también será multiplicada por el mismo factor λ.
El factor λ constituye el porcentaje que representa el nivel de producción Q resultante una vez aplicados los efectos directos de pérdida de producción por el cambio climático, en relación a la producción del escenario base.

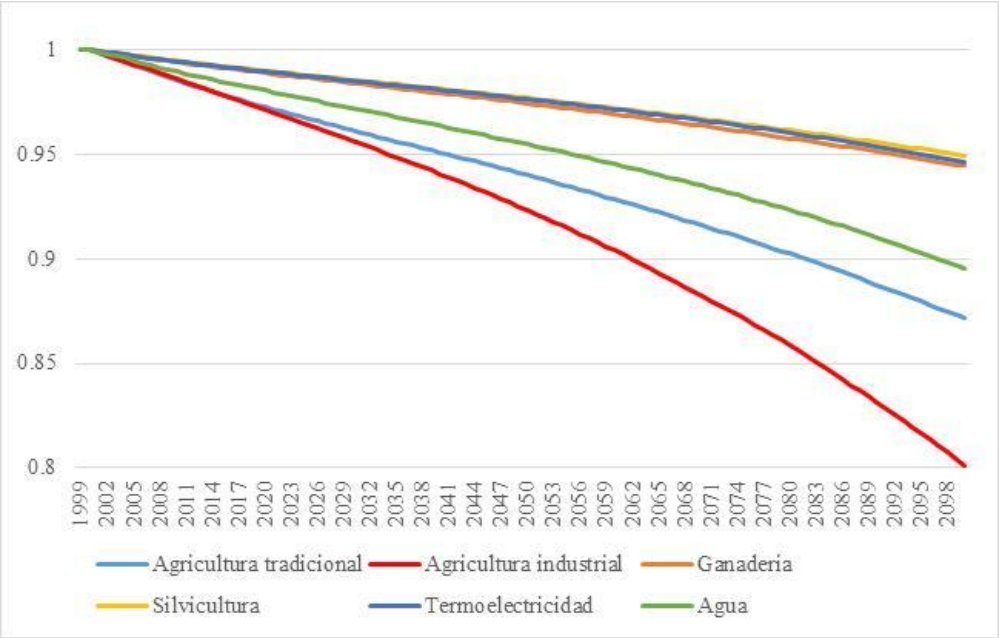
El Gráfico 19 y 20 presentan los valores de λ para cada uno de los sectores de producción, correspondientes a los escenarios A2 y B2, respectivamente. Se nota que el sector agroindustrial (AI) es el que tiene impactos directos más fuertes. El nivel de producción del sector cae para el año 2100 a un 80,1% de la producción del escenario base para el escenario A2 y a un 86,3% para el escenario B2. El sector de agricultura tradicional (AT) es el con segundo mayores impactos.

Gráfico 20: Escenario B2: Parámetro λ, por año y sector, para los sectores directamente afectados por el cambio climático



Fuente: Jemio et al. (2014).

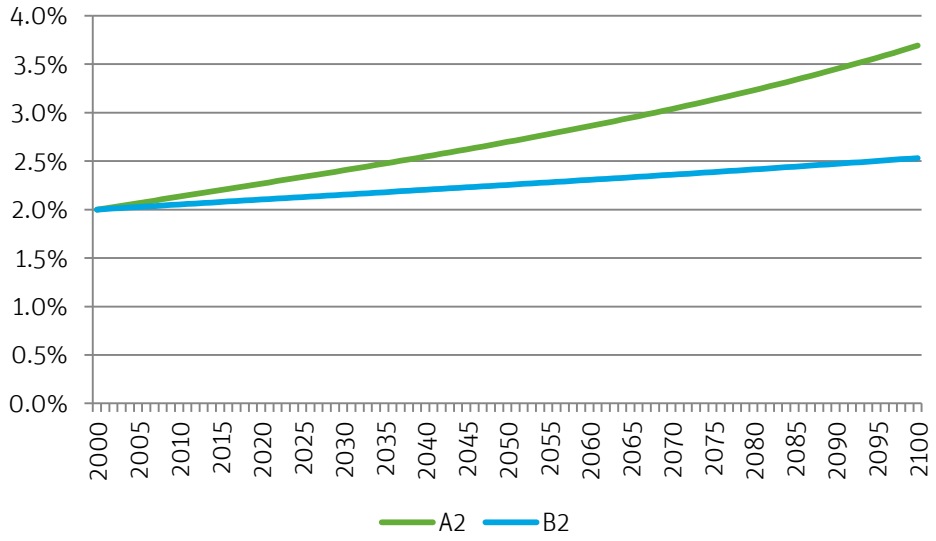
Gráfico 19: Escenario A2: Parámetro λ, por año y sector, para los sectores directamente afectados por el cambio climático



Fuente: Jemio et al. (2014).

Aparte de estos shocks a la producción de diversos sectores productivos, Jemio at al. (2014) también introduce shocks que corresponden a pérdidas de infraestructura pública por precipitaciones fuertes como calculado en Arenas (2014). Estos shocks fueron expresados en términos de tasas de depreciación incrementales para ser introducidos al MEGC ($d' = d + \Delta d$). La tasa de depreciación en el escenario base es 2%. Las tasas de depreciación incrementales tienden a crecer en el tiempo en ambos escenarios, lo que refleja que los efectos negativos del cambio climático sobre la infraestructura pública tienden a ser mayores a medida que pasan los años. En el escenario A2 la tasa de depreciación incremental llega a ser 1,7% para el año 2100 y 0,5% para el escenario B2 (Gráfico 21).

Gráfico 21: Escenarios A2 y B2: Tasas de depreciación del stock de capital público (d') equivalentes a la depreciación más las pérdidas de infraestructura



Fuente: Jemio at al. (2014).

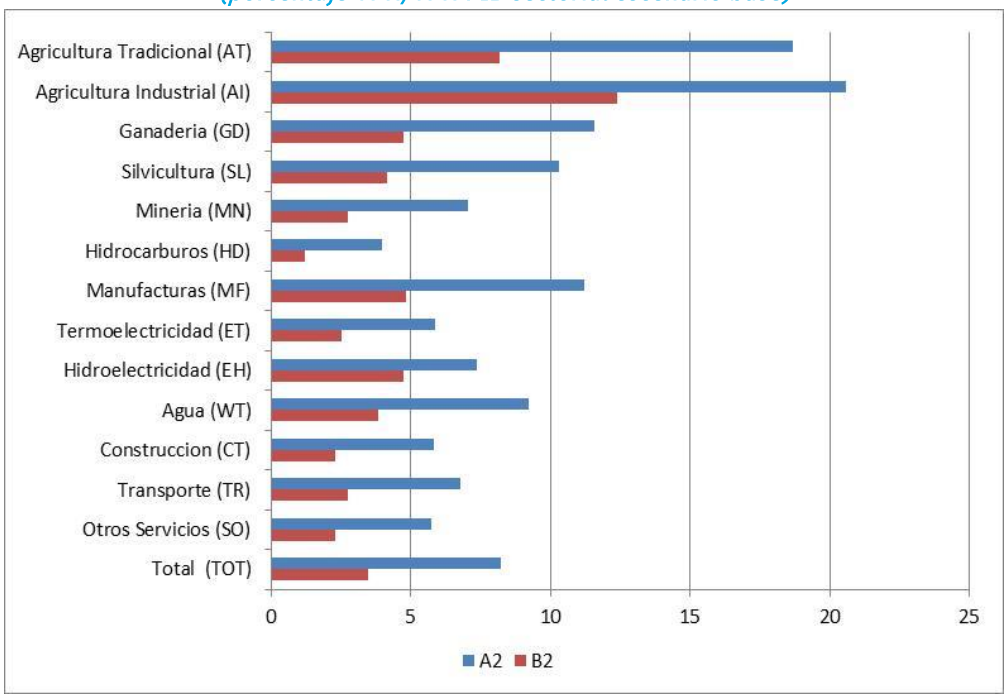
6.3. Impactos totales del cambio climático sobre el sector agropecuario

Después de introducir todos los impactos directos del cambio climático en el modelo de equilibrio general, Jemio et al. (2014) reportan los impactos finales del cambio climático sobre los diferentes sectores[12]. La agricultura industrial (AI) es el sector que experimenta los mayores impactos negativos, i.e. pérdidas de 20 y 12,2 por ciento del PIB sectorial en los escenarios A2 y B2, respectivamente. La agricultura tradicional (AT) también experimenta impactos significativos, de 18,1 y 8 por ciento del PIB sectorial para ambos escenarios. Ganadería (GD) tiene pérdidas de 11,1 y 4,6 por ciento del PIB del sector para el escenario A2 y B2 y silvicultura (SL) pérdidas de 9,8 y 4,0 por ciento (ver el Gráfico 22).

La industria manufacturera (MF) es el sector que no estando directamente expuesto a los efectos del cambio climático, experimenta las mayores pérdidas de PIB sectorial como consecuencia de los efectos indirectos que se transmiten al sector a través de la caída en la provisión de insumos, menor demanda debido a la caída de ingresos y daños en la infraestructura que afecta las actividades de este sector. Las pérdidas de este sector alcanzan a 10,8 y 4,6 por ciento del PIB sectorial para los escenarios A2 y B2.

[12] En este documento reportamos los resultados sin adaptación a través de mayores inversiones en infraestructura pública.

Gráfico 22: Escenario A2 y B2: Pérdidas totales incluyendo adaptación (porcentaje VPN/VPN PIB sectorial escenario base)



Fuente: Elaboración propia en base a información de Jemio at al. (2014).

El Cuadro 14 resume los impactos totales (directos, indirectos y cumulativos) sobre el sector agropecuario en Bolivia durante el periodo 2010-2100.

Cuadro 14: Impactos totales del cambio climático sobre el sector agropecuario (2010-2100)

Sectores	VPN Pérdidas Producción (MM US$ de 2007)		VPN como % VPN PIB Sectorial escenario base		VPN como % VPN PIB Total escenario base	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Agricultura Tradicional	59.691	26.246	18,14	7,98	1,20	0,53
Agricultura Industrial	21.495	13.127	20,01	12,22	0,43	0,26
Ganadería	19.630	8.080	11,08	4,56	0,40	0,16
Silvicultura, Caza y Pesca	4.691	1.898	9,82	3,98	0,09	0,04
Total sector agropecuario	105.507	49.352	15,95	7,46	2,12	0,99

Fuente: Elaboración propia en base a información de Jemio at al. (2014).

Nota: El Valor Presente está calculado usando una tasa de descuento de 0,5%.

En el escenario A2 el valor neto presente de las pérdidas totales que sufrirá el sector agropecuario durante el resto del siglo llega a 106 mil millones de dólares reales de 2007. Esto corresponde a un promedio de 16% del PIB agropecuario, pero obviamente la pérdida es mayor hacia el final del siglo mientras que es menos al principio. En porcentaje del PIB total, asciende a 2,12% en promedio durante el resto del siglo. En el escenario B2 los impactos adversos son un poco menor que la mitad del escenario A2.

Comparando con los impactos directos sobre el sector agropecuario, se nota que los impactos totales son aproximadamente 2,4 veces mayores. Esto significa que estudios que ignoran los efectos indirectos y dinámicos del cambio climático tienden a sub-estimar considerablemente los impactos totales.

7. Conclusiones y recomendaciones

El cambio climático va a afectar al sector agropecuario en muchas y diferentes maneras. En el presente estudio hemos analizado los efectos brutos iniciales de cambios en el clima sobre los rendimientos agrícolas, pero también hemos calculado los efectos netos permitiendo adaptación espontánea a través de la sustitución de cultivos. Adicionalmente a estos efectos hemos aumentado el efecto de la fertilización de CO_2, el efecto de aumento en la frecuencia de eventos extremos, el efecto de cambios en el nivel de biodiversidad y servicios eco-sistémicos que sostienen el sector, y el efecto de cambios en disponibilidad de agua para riego.

Estos son todos los efectos directos que hemos podido demostrar empíricamente sobre el sector agropecuario en Bolivia y de acuerdo a nuestros cálculos, estos efectos directos sumarian pérdidas de 45 mil millones de dólares (valor neto presente con una tasa de descuento de 0,5%) durante el periodo 2010-2100, lo que corresponde a un promedio de 6,8% del valor presente neto del PIB sectorial durante el mismo periodo.

Sin embargo, aparte de los impactos directos, hemos considerado también los impactos indirectos y dinámicos que son muy importantes. Estos efectos ocurren porque lo que pasa en el sector agropecuario va a tener efectos sobre los otros sectores, y lo que pasa en los otros sectores va a afectar el sector agropecuario. Son particularmente importantes los impactos del aumento en eventos extremos sobre la infraestructura pública, especialmente caminos, lo que va a afectar adversamente el sector agropecuario.

Además, lo que pasa en un año va a afectar la situación en todos los años subsecuentes, generándose efectos dinámicos importantes. De acuerdo a nuestros cálculos, el valor presente neto de los efectos totales sumaria pérdidas de 106 mil millones de dólares durante el periodo 2010-2100, lo que corresponde a un promedio de 16% del valor neto presente del PIB sectorial. Obviamente, dado que el clima tiende a volverse más y más extremo, los impactos tienden a aumentar en el tiempo y terminan al final del siglo con impactos mucho más altos que el 16%.

El hecho que los impactos totales son 2,4 veces mayores que los impactos directos, señala la importancia de incluir los efectos indirectos para obtener una visión más completa sobre lo que puede pasar con el sector agropecuario debido al cambio climático.

Cada uno de los diferentes tipos de impactos afecta las diferentes áreas de Bolivia con diferente fuerza. Por ejemplo, desertificación y falta de riego afectará sobre todo el Altiplano mientras que inundaciones por precipitaciones fuertes afectaran sobre todo las tierras bajas (si el clima cambiara como señalado por el modelo PRECIS). Fertilización de CO_2 afecta positivamente todo el territorio, pero más a las áreas húmedas que a las áreas secas. Las opciones de adaptación espontanea son mejores para áreas frías, ya que pueden adoptar cultivos que rinden bien en climas más calientes. En cambio las áreas más calientes de Bolivia tienen pocas opciones de adaptación dado que ya están usando los cultivos más aptos para climas muy calientes y no se conocen cultivos adecuados para climas aún más calientes.
Aunque existe mucha incertidumbre sobre los procesos físicos de cambio climático durante los próximos 100 años y sobre la evolución del sector agropecuario en general, los resultados del presente estudio respaldan las siguientes recomendaciones de política:

- Para aprovechar el aumento inevitable en la concentración de CO_2 en la atmósfera, se recomienda un programa de investigación sistemática para identificar cuales especies de cultivos reaccionan mejor a esta fertilización bajo las diferentes condiciones relevantes para Bolivia.

- Para aliviar la falta de lluvia en ciertos lugares que ya sufren sequías frecuentemente, y que probablemente sufrirán más en el futuro, sería necesario aumentar la cobertura de sistemas de riego y sistemas de captura de agua.

- Para reducir las pérdidas por las inundaciones, que probablemente aumentarán en frecuencia y severidad por los cambios climáticos, es importante mejorar el sistema de planificación territorial y reducir la deforestación ilegal.

8. Referencias

Ainsworth, E. A. & S. P. Long (2005) "What have we learned from 15 years of free-air CO_2 enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO_2" *New Phytologist*, 165: 351-371.

Alves, L, M, (2007) Simulações da Variabilidade do Clima Presente sobre a América do Sul Utilizando um Modelo Climático Regional, Dissertação de Mestrado do Curso de Pós- Graduação em Meteorologia, INPE, São José dos Campos, Brazil,

Andersen, L. E., L. C. Jemio, O. Molina & G. Lora (2013) " Guía de diez pasos para la estimación de los impactos del cambio climático." Guía elaborada para el proyecto "Capacitación sobre evaluación de las implicaciones económicas del cambio climático y retroceso glaciar en los países de la Comunidad Andina" solicitado por la Comunidad Andina de Naciones. La Paz, enero.

Andersen, L.E. 2014. *La economía del cambio climático en Bolivia: Impactos sobre la Biodiversidad*. C.E. Ludeña y L. Sanchez-Aragon (eds), Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 192, Washington, DC.

Andrade, M.F. 2014. *La economía del cambio climático en Bolivia: Validación de Modelos Climáticos*. C.E. Ludeña y L. Sanchez-Aragon (eds), Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 184, Washington, DC.

Arenas, J.C. 2014. *La economía del cambio climático en Bolivia: Impactos de eventos extremos sobre Infraestructura y producción Agropecuaria*. C.E. Ludeña y L. Sanchez-Aragon (eds), Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 190, Washington, DC.

BID y CEPAL. 2014. *La Economía del Cambio Climático en el Estado Plurinacional de Bolivia*. C.E. Ludeña, L. Sanchez-Aragon, C. de Miguel, K. Martínez, y M. Pereira (eds). Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 220 y Naciones Unidas LC/W.627.

Baker, J.T. (2004) "Yield responses of southern US rice cultivars to CO_2 and temperature." *Agricultural and Forest Meteorology* 122: 129-137.

Calvo Cárdenas, N. 2014. *La economía del cambio climático en Bolivia: Cambios en la Demanda Hídrica*. C.E. Ludeña y L. Sanchez-Aragon (eds), Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 187, Washington, DC.

CEPAL (2007) Alteraciones Climáticas en Bolivia: Impactos Observados en el Primer Trimestre de 2007.

Cline, W. (2007) "Global warming and agriculture: Impacts estimates by country" Center for global development. PETERSON INSTITUTE FOR FOR INTERNATIONAL ECONOMICS

De Costa, W.A.J.M., Weerakoon, W.M.W., Chinthaka, K.G.R., Herath, H.M.L.K. and Abeywardena, R.M.I. (2007) "Genotypic variation in the response of rice (*Oryza sativa* L.) to increased atmospheric carbon dioxide and its physiological basis." *Journal of Agronomy and Crop Science* 193: 117-130.

Ferris, R., Wheeler, T.R., Ellis, R.H. and Hadley, P. (1999) "Seed yield after environmental stress in soybean grown under elevated CO_2." *Crop Science* 39: 710-718.

INE/PNUD. (2005) Bolivia: Atlas estadístico de Municipios 2005. La Paz, Bolivia.

IPCC (2007) Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Jemio, L.C., L.E. Andersen, C.E. Ludeña, C. de Miguel, M. Pereira. 2014. La economía del cambio climático en Bolivia: Estimación de Impactos en Equilibrio General. Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 201, Washington, DC.

Jones, R,G., Noguer, M., Hassell, D.C., Hudson, D., Wilson, S.S., Jenkins, G.J. and Mitchell, J.F.B. (2004) "Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS, Met Office Hadley Centre," Exeter, UK, 40pp, April,

Kurukulasuriya P. & Mendelsohn R. (2008) "Crop switching as a strategy for adapting to climate change": AfJARE Vol 2 No 1

Long, S. P., E. A Ainsworth, A. D. B. Leakey & P. B. Morgan (2005) "Global food insecurity: Treatment of major food crops with elevated carbon dioxide or ozone under large-scale fully open-air conditions suggests recent models may have over-estimated future yields," *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 360(1463): 2011-2020.

Maroco, J.P., Edwards, G.E. and Ku, M.S.B. (1999) "Photosynthetic acclimation of maize to growth under elevated levels of carbon dioxide." *Planta* 210: 115-125.

Mendelsohn, R. (2000) "Efficient adaptation to climate change" *Climatic Change* 45: 583–600.

Mendelsohn, R., W. Norrison, M. Schlesinger & N. Andronova (2000) "Country specific market impacts of climate change." *Climatic Change* 45: 553–569.

Morales R., Galoppo E., Jemio L., Choque M. & Morales N. (2000) "Bolivia: Geografía y Desarrollo Económico". Inter-American Development Bank. Research Network Working paper #R-387

Olivo, N., C. A. Martinez, & M. A. Oliva. (2002) "The photosynthetic response to elevated CO_2 in high altitude potato species (Solanum curtilobum)" *Photosynthetica* 40: 309-313.

Parry, M.L., C. Rosenzweig, A. Iglesias, M. Livermore & G. Fischer (2004) "Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios." *Global Environmental Change*, 14: 53-67, doi:10.1016/j.gloenvcha.2003.10.008.

Programa Mundial de Alimentos-PMA (2008) Diagnóstico, modelo y atlas municipal de seguridad alimentaria en Bolivia. Naciones Unidas. La Paz, Marzo.

PNUD (2004) Índice de Desarrollo Humano en los municipios de Bolivia. Informe Nacional de Desarrollo Humano 2004. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo. La Paz.

Seo, N. & R. Mendelsohn (2008) "An analysis of crop choice: Adapting to climate change in South American farms" . *Ecological Economics* 67: 109-116.

Seo, N. & R. Mendelsohn (2007) "A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on Latin American Farms, World Bank, Working Paper 4163.

Sicher, R.C. & J. A. Bunce (1999) "Photosynthetic enhancement and conductance to water vapor of field-grown Solanum tuberosum (L.) in response to CO_2 enrichment." *Photosynthesis Research* 62: 155-163.

Travasso, M. I., G. O. Magrin, W. E. Baethgen, J. P. Castaño, G. R. Rodriquez, J. L. Pirez, A. Gimenez, G. Cunha & M. Fernandez (2007) "Maize and soybean cultivation in southeastern South America: Adapting to Climate Change." Capítulo 19 en: N. Leary, J. Adejuwon, V. Barros, I. Burton, J. Kulkarni & R. Lasco (2007) Climate Change and Adaptation. Earthscan Publications.

UDAPE (2004) " Sector Agropecuario Bolivia: 1980-2004" UDAPE Dossier de Estadísticas en *www.udape.gov.bo*

Viscarra, F. E. (2009) "Adaptation to Climate Change Departmental Pilot Program: Climate Change Impact Assessment of Rice Yields in the Production Areas of Santa Cruz Bolivia." Fundación Amigos de la Naturaleza. December.

Widodo, W., Vu, J.C.V., Boote, K.J., Baker, J.T. and Allen Jr., L.H. (2003) "Elevated growth CO_2 delays drought stress and accelerates recovery of rice leaf photosynthesis." *Environmental and Experimental Botany* 49: 259-272.

Ziska, L.H., Manalo, P.A. and Ordonez, R.A. (1996) "Intraspecific variation in the response of rice (*Oryza sativa* L.) to increased CO_2 and temperature: growth and yield response of 17 cultivars." *Journal of Experimental Botany* 47: 1353-1359.

Anexo A: Estimación de beneficios por sustitución de cultivos

Los impactos brutos iniciales del cambio climático fueron estimados como los impactos netos más los beneficios potenciales de sustitución de cultivos hacia cultivos más adecuados para el clima futuro. En este anexo se explica cómo se ha estimado los beneficios potenciales de sustitución de cultivos.

Como la elección de tipo de cultivo es una elección discreta, se usó el modelo *logit multinomial* que ha encontrado diversas aplicaciones en aquellos contextos en los que la variable dependiente representa una elección, como, por ejemplo, la elección de carrera profesional, el voto electoral o la elección de medios de transporte. En el contexto particular de elección de cultivos este modelo se ha utilizado en muchos estudios entre los que destacan: Mendelsohn et al., 2000; Seo & Mendelsohn, 2007; Seo & Mendelsohn, 2008; Kurukulasuriya & Mendelsohn, 2008; Seo et al., 2008.

La base de datos utilizada en este estudio es la Encuesta Continua de Hogares 2003-2004 construida por el Instituto Nacional de Estadística (INE). El INE realiza encuestas de hogares desde 1989 en las ciudades principales y desde 1996 a nivel nacional. Sin embargo, la encuesta 2003-2004 tiene una característica especial, ya que es la única realizada de manera continua (durante todo el año en vez de un solo mes), por lo cual se considera este tipo de encuestas más representativas especialmente a nivel rural, teniendo en cuenta la estacionalidad de la producción agropecuaria.

Adicionalmente se incluyó variables climatológicas a nivel municipal, con datos acerca de la temperatura promedio, precipitación promedio desviación estándar de la temperatura y precipitación. Así también se incluyen variables que tienen que ver con características municipales como ser potencial agrícola, forestal, altura, tasa de mortalidad entre otras.

En la encuesta de hogares 2003-2004, se cuenta con 1.677 hogares con producción agropecuaria, de los cuales se tiene información acerca de las características de su producción agropecuaria para el año anterior (12 meses). Sin embargo después de corregir los datos y limpiar de las observaciones con datos erróneos o incompletos, se pudo obtener 1.638 hogares.

De estos hogares se puede observar en el Cuadro A1 que en promedio los productores agropecuarios a nivel hogares en Bolivia tienen 4 cultivos donde la observación mínima es obviamente 1 cultivo y la máxima es 13 cultivos. La mediana es de 3 cultivos por unidad de producción. También se observa que en promedio los productores tienen 2 hectáreas cultivadas, donde la observación mínima es de 2 metros cuadrados, la observación máxima es de 100 hectáreas y la mediana es de aproximadamente 1 hectárea. Por otro lado, en promedio las familias productoras agropecuarias tiene 4,5 miembros por familia, la observación máxima es de 17 miembros en una familia y la mediana es de 4 miembros por familia.

Cuadro A1. Datos estadísticos productores agropecuarios

Variable	*Media*	*Mínima*	*Máxima*	*Mediana*
Número de cultivos	3,58	1,00	13	3,00
Hectáreas Cultivadas	2,00	0,00	100	0,97
Número de miembros en la familia	4,56	1,00	17	4,00

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la ECH 03-04.

Para realizar el análisis *logit multinomial*, se procedió a calcular el tipo de cultivo a nivel agregado más cultivado (en uso de tierra) por la familia, considerando al cultivo más importante como el cultivo que representa una mayor parte de la superficie cosechada, teniendo en cuenta que los hogares maximizan su producción y que realizan la distribución de su tierra entre los diferentes cultivos, considerando los costos e ingreso, beneficios y limitaciones de esa distribución. Es también importante mencionar que para el estudio *logit multinomial* se omitieron a los hogares donde la superficie utilizada para la producción total de cultivos no supere los 100 metros cuadrados.

Con lo que se obtiene los siguientes datos acerca de los principales cultivos para las familias agropecuarios. Como se mencionó antes, la agregación de cultivos se hace a nivel agregado tomando en cuenta la gran cantidad de cultivos existentes.

Como se puede observar en el cuadro No. A2, la mayoría de los productores se dedica especialmente a producir cereales (48%), seguido de tubérculos (26%) y hortalizas (7%), como los cultivos más importantes, las demás agregaciones de cultivos tienen muy poca participación. En un análisis a nivel regional, cabe destacar que en el altiplano los cultivos de tubérculos son los más cultivados, seguidos de cereales y hortalizas, en el valle los cultivos más importantes son cereales, seguido por tubérculos y hortalizas, mientras que en los valles los cultivos más importantes son cereales, frutas y hortalizas.

Cuadro A2. Número de hogares que producen diferentes tipos de cultivos, por macro-región

Cultivo	Región			Total	Total (%)
	Altiplano	Valle	Llano		
Cereales	151	335	274	760	47,95
Cereales & Forrajes	1	9	0	10	0,63
Cereales & Frutas	0	2	6	8	0,50
Cereales & Hortalizas	1	3	6	10	0,63
Cereales & Industriales	0	2	1	3	0,19
Cereales & Tubérculos	25	22	15	62	3,91
Estimulantes	28	3	0	31	1,96
Flores	0	1	0	1	0,06
Flores & Tubérculos	0	1	0	1	0,06
Forrajes	14	13	0	27	1,70
Forrajes & Tubérculos	8	0	0	8	0,50
Frutas	12	33	33	78	4,92
Frutas & Tubérculos	0	0	6	6	0,38
Hortalizas	43	39	30	112	7,07
Hortalizas & Tubérculos	9	6	0	15	0,95
Industriales	0	9	21	30	1,89
Más de tres cultivos	3	5	6	14	0,88
Tubérculos	272	119	18	409	25,80
TOTAL	567	602	416	1585	100,00

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la ECH 03-04.

Los hogares que tienen más de un cultivo como cultivos importantes tienen poca relevancia dentro de las familias productoras. Solamente 141 familias dentro de las 1638 se dedican a producir en la misma cantidad de terreno 2 o más grupos de cultivos. Por lo cual para el análisis *logit multinomial* se realizara para los siguientes grandes agregados de cultivos:

Cuadro A3. Cultivos más importantes

Cultivo más importante	Frecuencia	Porcentaje
Cereales	760	56,6
Tubérculos	409	30,5
Hortalizas	112	8,3
Otros	61	4,5
Total	1342	100,0

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la ECH 03-04.

Después de toda la depuración como se observa en el cuadro anterior se obtuvieron 1384 hogares, divididos en Cereales, Tubérculos, Hortalizas, y Otros, que comprende a Estimulantes, Frutas e Industriales. De estos se puede obtener los siguientes datos con los que se puede ver la forma y distribución de la producción agrícola entre las distintas temperaturas y precipitaciones

Dentro de las variables explicativas se encuentran temperatura, temperatura al cuadrado, precipitación, precipitación al cuadrado, la desviación estándar respecto de la media para la temperatura, desviación estándar respecto de la media para precipitación, potencial agrícola, pecuario, probabilidad de heladas, número de miembros dentro del hogar, número de miembros hombres dentro del hogar, educación máxima en el hogar y educación máxima al cuadrado, características de producción agrícola como es el número de personas que trabajan activamente en la producción, variables dummy de uso de asistencia técnica, fertilizantes, pesticidas, maquinaria y el número de hectáreas cultivadas.
El Cuadro A4 presenta los resultados de la estimación del modelo de elección. La categoría base es la categoría más común, es decir cereales.

Cuadro A4. Modelo de elección de cultivos (logit multinomial)

Variables	Otros		Hortalizas		Tubérculos	
Temperatura media	-0,57		-0,70	**	-0,46	**
Temperatura media^2	0,01		0,02	**	0,00	
Precipitación	0,14		0,01		0,04	**
Precipitación^2	0,00		0,00	*	0,00	**
Sd Temperatura	1,51		-1,68		2,75	***
Sd Precipitación	0,61		-0,07		-0,22	
Potencial Agrícola	0,64		0,05		0,37	**
Potencial Forestal	-0,05		-0,17		0,21	
Probabilidad de Heladas	0,86	*	0,46	*	0,04	
Número de miembros en el hogar	-0,37	***	0,03		-0,04	
Número de miembros hombres en el hogar	0,39	***	-0,05		0,08	
Educación máxima en la familia	0,16		0,14		0,09	
Educación máxima en la familia^2	0,00		-0,01		0,00	
Personas empleadas en producción agrícola	0,02		0,00		-0,02	
Asistencia técnica	1,15	*	0,33		-0,06	
Uso de Fertilizantes	0,09		0,45		0,14	
Uso de pesticidas	1,36		1,33	***	0,62	**
Uso de Maquinaria	0,52		0,39		0,14	
Hectáreas Cultivadas	-0,28		-0,38	***	-0,36	***
Constante	-12,69	**	2,66		-1,15	

Notas: Categoría base: Cereales; ***significativo al 1%, **significativo al 5%, *significativo al 10%

Pseudo R^2=0,30

Numero de Observaciones=1342

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la ECH 03-04.

Los resultados nos muestra que las variables climáticas son importantes en la decisión de los hogares de que producir, ay que todas las categorías consideran por lo menos a alguna variable climática como responsable significativamente de la decisión acerca de que producir.

Por ejemplo la variable temperatura afecta positivamente la producción de frutas y negativamente la producción de hortalizas y tubérculos, lo que quiere decir que ante mayores niveles de temperatura promedio la probabilidad de cultivar frutas sobre cereales aumenta, mientras la probabilidad de cultivar hortalizas y tubérculos en vez de cereales disminuye.

Así también la precipitación afecta positivamente la producción de hortalizas sobre cereales y negativamente la producción de frutas sobre cereales.

La variación de la temperatura afecta positivamente la producción de tubérculos e industriales sobre cereales y negativamente la producción de estimulantes sobre cereales. La variación en la precipitación respecto de la media afecta positivamente la producción de industriales sobre cereales, y negativamente la producción de frutas, hortalizas, industriales y estimulantes.

Sin embargo, para poder interpretar y usar los resultados de un modelo *logit multinomial*, es necesario calcular los efectos marginales (Stata tiene un comando estándar para esto). El Cuadro A5 reporta los efectos marginales para los variables climáticos.

Cuadro A5. Efectos Marginales

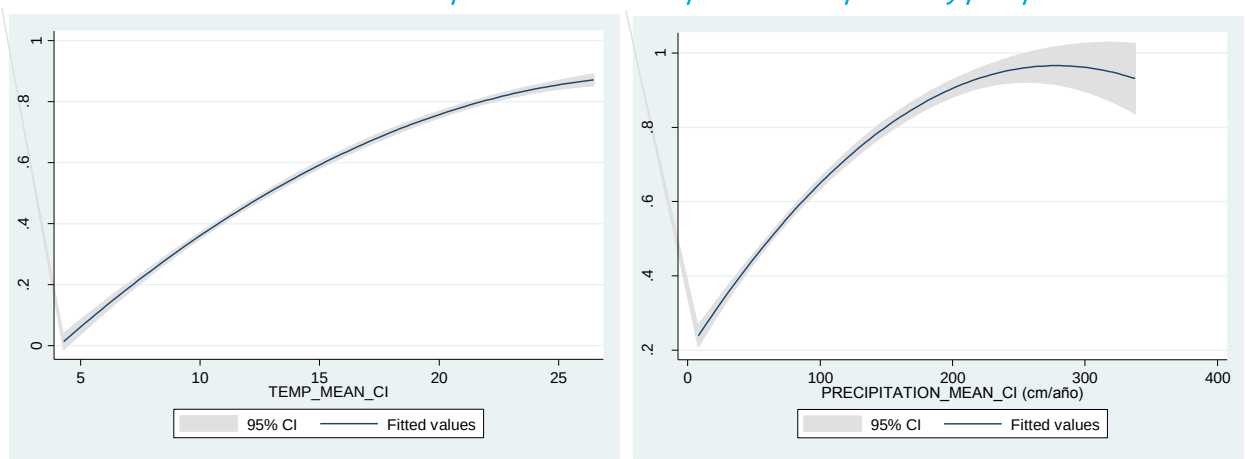
Variables	Cereales		Hortalizas		Tubérculos		Otros	
Temp. media	0,103	***	-0,027	*	-0,073	**	-0,003	
Temp. media^2	-0,001		0,001	**	0,000		0,000	
Precipitación	-0,008	**	0,000		0,007	**	0,001	*
Precipitación^2	0,000	**	0,000	**	0,000		0,000	*
Sd. Temperatura	-0,399	**	-0,109	**	0,501	**	0,007	
Sd. Precipitación	0,036		-0,001		-0,040		0,005	

Nota. ***significativo al 1% **significativo al 5% *significativo al 10%

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la ECH 03-04.

Los cereales son sensibles a la temperatura y a la variación de la media de la temperatura, pero no a la temperatura al cuadrado, el efecto es fuerte y muy significativo, así también los cereales son sensibles a la precipitación y precipitación al cuadrado, lo que nos muestra una relación cuadrática que se observa en los siguientes gráficos.

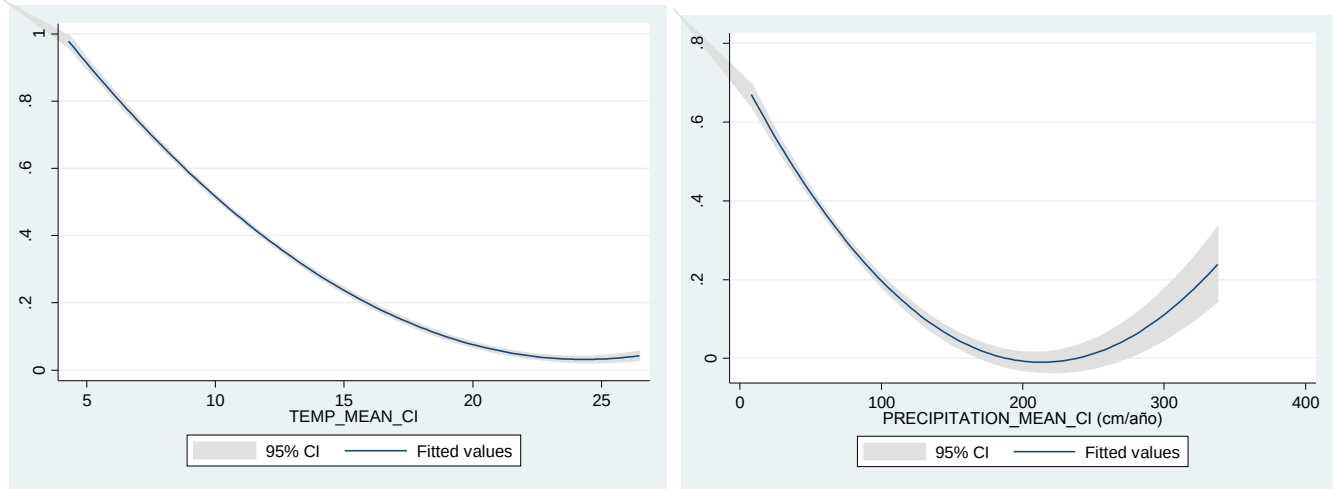
Gráfico A1: Probabilidad de producir cereales respecto a la temperatura y precipitación



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte los tubérculos son sensibles a la temperatura, a la variación en la temperatura y al a precipitación, pero presentan una relación lineal con la temperatura y la precipitación, la relación nos muestra que ante mayores niveles de temperatura la probabilidad de producción de tubérculos disminuye. Y la relación con la precipitación es similar, sin embargo los intervalos de confianza son mayores ante mayores niveles de precipitación.

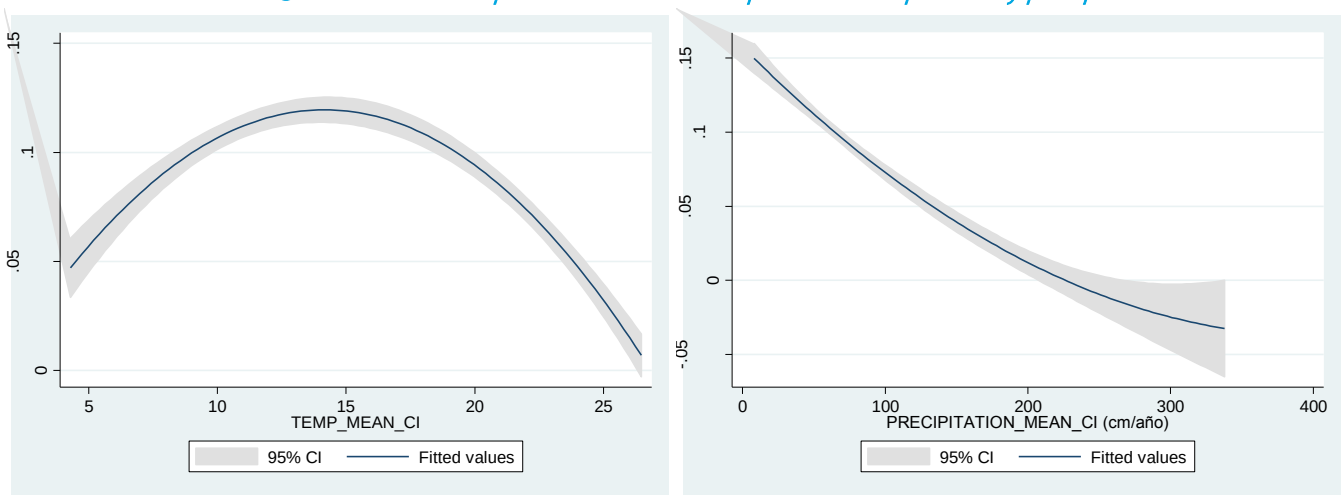
Gráfico A2: Probabilidad de producir tubérculos respecto a la temperatura y precipitación



Fuente: Elaboración propia.

La elección de hortalizas es sensible a la temperatura, temperatura al cuadrado, la variación de la media de la temperatura y a la precipitación al cuadrado. La probabilidad de elección en si es baja y nos muestran que la probabilidad de elección de hortalizas aumenta hasta los 15 ºC y posteriormente disminuye. Para el caso del efecto de la precipitación sobre la probabilidad de elección de hortalizas disminuye con el aumento de la precipitación, donde se observa también un aumento en los intervalos de confianza ante mayores niveles de precipitación.

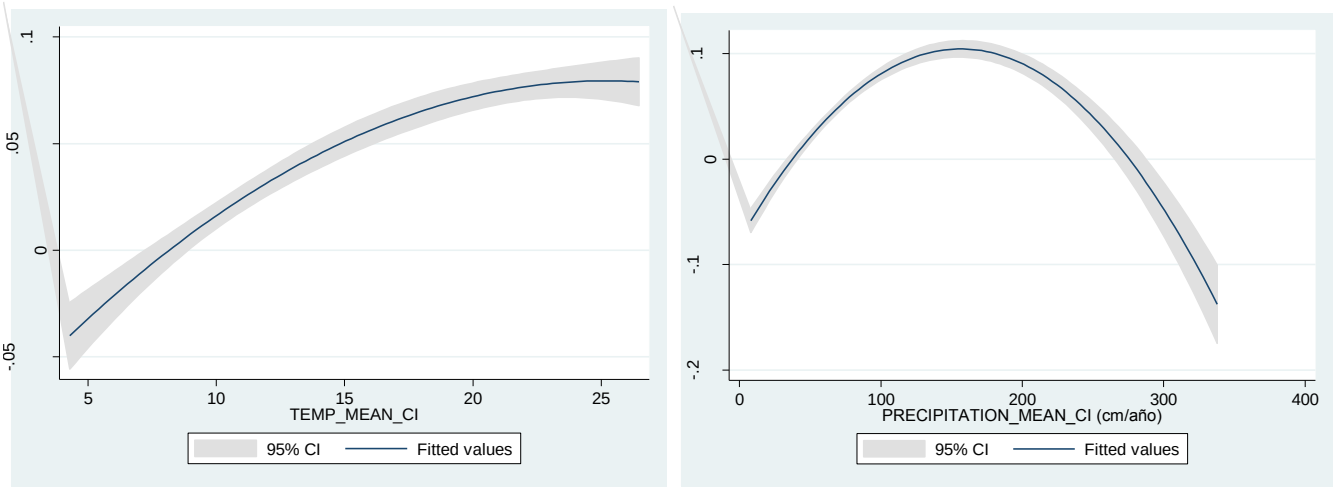
Gráfico A3: Probabilidad de producir hortalizas respecto a la temperatura y precipitación



Fuente: Elaboración propia.

Por último la probabilidad de cultivo de otros es muy baja y es sensible a la precipitación y la precipitación al cuadrado. Este hecho (la no significancia de otras variables climáticas) se puede explicar, por qué este grupo es un compuesto de varios sub grupos, diferentes entre ellos mismo y con distintas cualidades, tolerancias y necesidades, aunque estos 3 grupos se caracterizan por ser propios de mayores niveles de temperatura. Las estimaciones nos muestran que la probabilidad de producción de otros aumenta con la temperatura y que la probabilidad de cultivar "otros" aumenta hasta una precipitación de 150 cm/año y posteriormente disminuye.

Gráfico A4: Probabilidad de producir otros respecto a la temperatura y precipitación



Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidas los efectos del clima sobre la probabilidad de cultivar cierto cultivo (a través del modelo *logit multinomial* a nivel de productores), se calculan promedios a nivel municipal y se interpola las probabilidades tomando en cuenta los efectos marginales para obtener una nueva base de datos con las probabilidades de cada cultivo para todos los municipios (ver Gráficos 3 y 4 en la sección 3.2).

Usando estas curvas y los cambios climáticos esperados a nivel municipal de acuerdo al modelo PRECIS hacemos una simulación para determinar los potenciales beneficios de substitución de cultivos en cada uno de

los municipios. El Cuadro A6 muestra los resultados. En promedio, los agricultores pueden mejorar sus ingresos en unos 15% si sustituyen a cultivos más apropiados para el clima futuro en vez de seguir cultivando lo mismo que ahora. Los beneficios potenciales por sustitución son más altos en las tierras altas (Potosi y Oruro) porque las mayores temperaturas les permitan introducir cultivos más rentables que el clima frio de ahora no permite. En cambio, las posibilidades de ganancias por sustitución son muy limitados en las áreas con temperaturas actualmente muy altas (especialmente Pando) porque no existen cultivos adecuados para climas aún más calientes.

Cuadro A6: Beneficios potenciales por sustitución de cultivos en 2100 en el Escenario A2

Departamento	Beneficio por sustitución de cultivos (USD/persona/año)	Beneficio por sustitución de cultivos (cambio porcentual en ingresos rurales)
Beni	+47	+5
Chuquisaca	+82	+15
Cochabamba	+87	+16
La Paz	+80	+11
Oruro	+113	+17
Pando	+12	+1
Potosí	+113	+28
Santa Cruz	+102	+11
Tarija	+104	+12
Bolivia	+91	+15

Fuente: Estimación propia.

BID

www.iadb.org/cambioclimatico

Síguenos en twitter @BIDcambioclima