

Impactos del clima y de la concentración de dióxido de carbono en la producción agrícola: maíz y soya en las tierras bajas de Bolivia

Recibido: 10-03-2017 / Revisado: 22-04-2017 / Aceptado: 27-09-2017

Federico Ernesto Viscarra Riveros, Ph.D.

Jefe de Investigación Universidad Tecnológica Privada de Santa Cruz (UTEPSA), Bolivia.

jefe.investigacion@utepsa.edu

Resumen

Debido al aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, se esperan incrementos en la temperatura media y en los eventos extremos para muchas partes del planeta. Estos efectos, combinados con una probabilidad más alta de eventos extremos (sequías e inundaciones), tendrán serios impactos en el sector agrícola. El clima influye en el crecimiento y rendimiento de los cultivos directamente a través de impactos en la fenología, fotosíntesis y otros procesos fisiológicos. La temperatura y la disponibilidad de agua son los determinantes principales en la demanda evaporativa y de transpiración de los cultivos, factores que podrían cambiar el tiempo que transcurre desde la siembra hasta la madurez, reduciendo en última instancia los rendimientos por hectárea. Las altas concentraciones de CO₂ en la atmósfera también tienen un efecto directo en el crecimiento de las plantas (mayormente positivo, debido a la mayor cantidad de nutrientes de carbono disponibles); impacto comúnmente conocido como el efecto fertilización. En suma, el efecto neto del cambio climático viene del balance entre estos efectos positivos y negativos. En este sentido, se pueden encontrar muchos estudios en la literatura que describen los impactos del cambio climático en la agricultura a nivel mundial, regional y por países, utilizando modelos matemáticos de cultivos. Sin embargo, no existen estudios a una escala precisa para Bolivia como país, y mucho menos para el departamento de Santa Cruz. Es por ello que este documento aborda la base científica de la relación del cambio climático, los cultivos y el CO₂, calibrando y validando la serie de modelos matemáticos de cultivos CERES-Maize y CROPGRO-Soybeans incluidos en el software DSSAT v.4, para el maíz y la soya, respectivamente. Los resultados de los modelos coinciden con la base de la teoría científica y se encuentran dentro del rango de resultados de estudios previos. Las variaciones de temperatura y precipitación aisladas modifican los rendimientos de la soya entre -18% y +2%, y los rendimientos del maíz entre -25% y +9%, dependiendo de la zona de producción. Cuando se incluye al efecto fertilización, adicionalmente a los efectos del clima, las variaciones del rendimiento de la soya fluctúan entre +25% y +42% y; para el maíz, entre -10% y +19%, dependiendo de la zona de producción. El rango de variación es elevado, especialmente para el maíz, dadas las diferentes zonas agroecológicas de producción analizadas. Los cultivos pertenecientes a la familia de plantas C₃ tienen la tendencia a ser afectados de una manera más positiva por las concentraciones de CO₂ que los cultivos pertenecientes a la familia de plantas C₄. De la misma manera, los resultados muestran que la soya es más resistente a incrementos en la temperatura que el maíz.

Palabras Clave: Cambio Climático, Efecto Fertilización, CO₂, Modelos de Cultivos, Soya, Maíz, Bolivia.

Understanding Climate Change and Carbon Dioxide Effects in Agriculture: Soybeans and Maize in the Bolivian Lowlands

Abstract

Increases in both mean and extreme temperatures are expected for many places of the globe accompanied by a rise of CO₂ concentration in the atmosphere. The combined effects plus the increased probability of extreme events (droughts, floods), will have serious effects in

the agricultural sector. Climate influences crop growth and yields directly through impacts on phenology, photosynthesis, and other physiological processes. Temperature and water availability are key determinants in the evaporative and transpiration demand of crops, which might change the time from planting to maturity, ultimately reducing their yields. High concentrations of CO₂ in the atmosphere also have a direct effect on plant growth (mostly positive because of higher quantities of carbon nutrients), known as the fertilization effect. The net effect of climate change comes from a balance of these positive and negative effects. Several studies are found in the literature describing the impacts of climatic change in agriculture at a world, regional and country level using crop models. However, studies at a finer scale for Bolivia are not available yet. In this sense, this paper explains the scientific basis behind the relation of crop production, climate change and CO₂ fertilization specifically for yields of soybeans and maize (C3 and C4 family of plants, respectively) in the most important production zones of Bolivia, comparing the effects of climate change (isolated) and the effects of climate change plus the CO₂ fertilization effect using the CERES – Maize and CROPGRO – Soybeans Models of the DSSAT v.4 software. The model results agree with the scientific basis and are inside the range of results from previous studies. Just temperature and precipitation changes alter soybeans yields between -18% to +2%, and maize yields from -25% to +9%. When including CO₂ fertilization, the yield variations for soybeans range from +25% to +42% and for maize from -10% to +19%. The range of variation is high, especially for maize, given the different agro-ecological production areas. C3 plants will likely be more positively affected by CO₂ concentrations than C4 plants and soybeans are more resilient to warming than maize.

Keywords: *Climate Change, CO₂ fertilization effect, Crop Model, Soybeans, Maize, Crop Yields, Bolivia, DSSAT.*

1. Introducción

El clima influye directamente en el crecimiento de los cultivos y sus rendimientos, a través de impactos en su fenología, fotosíntesis y otros procesos fisiológicos. La temperatura y la disponibilidad de humedad afectan el tiempo que transcurre desde la siembra hasta la madurez y, en última instancia, a los rendimientos. La temperatura y humedad del ambiente están intrínsecamente relacionadas, dado que la temperatura es determinante en la demanda evaporativa y en la transpiración de los cultivos. Los efectos indirectos se relacionan con la disponibilidad de nutrientes, malezas, plagas y enfermedades, así como con la habilidad de los agricultores para trabajar en el campo. De esta manera, los cambios en la temperatura y precipitación afectan directa e indirectamente al crecimiento de la planta y a sus características. En algunos casos, el calentamiento global será beneficioso para el crecimiento de la planta, mientras que, en otros, éste será muy dañino. La misma lógica se aplica para los cambios en las precipitaciones. Por otro lado, las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, también tienen un efecto directo en el crecimiento de las plantas. Cuanto mayor sea la concentración de CO₂, mayor será la eficiencia del proceso de fotosíntesis de la planta. Altas concentraciones de CO₂ incrementan el crecimiento de la planta, porque la planta puede absorber más fácilmente mayores cantidades de nutrientes del carbono. Con suficiente disponibilidad de agua y nutrientes, el incremento del CO₂ será beneficioso para las plantas en general y para los cultivos en particular; a este fenómeno se lo conoce como el efecto

fertilización. Para estimar el efecto neto del cambio climático en el crecimiento de las plantas, es necesario realizar experimentos que modifiquen las condiciones climáticas y atmosféricas bajo las cuales el cultivo es producido, en un ambiente controlado. Esto es muchas veces difícil de reproducir; sin embargo, se han realizado algunos intentos, como el trabajo realizado por Ainsworth y Long, 2005, que muestran resultados muy interesantes. Por otro lado, el uso de modelos matemáticos de cultivos es una opción muy conveniente para cuantificar los impactos del cambio climático y de las condiciones atmosféricas en los rendimientos de los cultivos. Muchos estudios que se encuentran en la literatura describen los impactos del cambio climático a escalas mundial, regional y por país, utilizando modelos matemáticos de cultivos; entre ellos, el trabajo realizado por Parry, *et al.*, 1999 y 2004, y Gerald, *et al.*, 2009. Sin embargo, la mayor parte de estos estudios muestran resultados solamente en promedios a nivel país en términos de rendimiento, por un lado (por ejemplo, rendimiento por hectárea promedio para un grupo de cereales) y; por otro, resultados regionales promedio en términos de rendimiento por hectárea (por ejemplo, para toda Latinoamérica). A pesar de ello, en la realidad, la mayoría de los países muestran variaciones en términos agroecológicos, condiciones climáticas y tecnologías de producción. Por esta razón, existe la necesidad de tener resultados para cada uno de los cultivos individuales a una escala más precisa, para poder plantear políticas y respuestas más apropiadas al contexto. En este sentido, en el presente trabajo se experimentan y se analizan los efectos de diferentes escenarios de cambio climático en los rendimientos de la soya y el maíz. Para ello, previamente se calibran y validan los modelos matemáticos de cultivos CERES-Maize y CROPGRO-Soybeans, para las zonas agrícolas más importantes de Bolivia, en términos de producción. Primeramente, se cuantifican los efectos aislados de las variables climáticas; y después, se cuantifican y analizan los efectos de las variables climáticas, más el efecto fertilización proveniente de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera. Finalmente, ambos resultados son comparados.

1.1 Interacciones Clima – Cultivos

La Guía para Prácticas Meteorológicas Agrícolas, elaborada por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2010), sirve como buen punto de partida y literatura de consulta indispensable sobre las interacciones entre indicadores climáticos y rendimientos de cultivos. En las siguientes líneas, cada uno de los principales indicadores climáticos es analizado en los acápites 1.1.1 a 1.1.5, comenzando por los efectos de la temperatura y finalizando por el efecto fertilización, proveniente de las concentraciones de CO₂ en los rendimientos de los cultivos.

1.1.1 Efectos de la temperatura

El cambio climático afecta tanto a la temperatura promedio como a las temperaturas extremas. Si las temperaturas mensuales promedio se incrementan debido a un aumento de la temperatura mínima (por ejemplo, en las noches), las consecuencias para un cultivo pueden ser diferentes que el mismo cambio a consecuencia de un incremento en la temperatura diurna. Como mencionan Kukla y Karl, 1993, al incrementarse la temperatura nocturna se puede observar disminuciones en los rendimientos; mientras que, al incrementarse las temperaturas diurnas, se advierten incrementos en los rendimientos en latitudes más al norte del planeta (al incrementarse la duración del ciclo de crecimiento); pero, en latitudes más al sur, se aprecian reducciones en los rendimientos (debido a una maduración más temprana) (Droogers, *et al.*, 2004). Para la mayoría de los cultivos, las temperaturas elevadas reducen

los rendimientos, dado que existe menor cantidad de tiempo para capturar luz, agua y nutrientes (Lawlor y Mitchell, 2000). En latitudes más bajas, a causa del umbral de temperatura máxima, también se reproducen esos efectos. Las temperaturas elevadas durante las etapas tempranas de crecimiento serán normalmente beneficiosas para los cultivos, pero durante etapas posteriores (como la de máximo crecimiento) pueden ser perjudiciales, debido a la disminución de la duración de este periodo. En lugares más fríos (como es el caso de las latitudes más altas), un incremento en las temperaturas elimina las limitaciones de frío; por lo tanto, las productividades y rendimientos de cultivos podrían aumentar aún mucho más. En general, temperaturas más altas durante el periodo de crecimiento, estarán asociadas con una mayor radiación y una mayor demanda de agua que, juntamente con concentraciones elevadas de CO₂, generan interacciones primordiales que deben ser consideradas.

1.1.2 Disponibilidad de agua

La disponibilidad de agua es crucial para la actividad agrícola. Como se menciona en WMO, 2010, el impacto del cambio climático puede ocurrir a través de tres rutas principales: i) sequía: escasez de agua en un periodo de tiempo que cause un estrés fisiológico severo a los cultivos; ii) inundación: un exceso de agua durante un periodo de tiempo que puede causar un estrés físico directo y fisiológico en los cultivos; iii) disponibilidad de agua estacional: cuando no ocurre una severa escasez o un exceso de agua, pero su disponibilidad durante el año cambia, a tal punto que el lugar ya no es adecuado para las prácticas y cultivos agrícolas actuales. Al evaluar los impactos del cambio climático en áreas que utilizan irrigación, el análisis de disponibilidad de agua debe también considerar cómo la oferta es satisfecha y/o si existe la capacidad de almacenaje suficiente de agua para irrigación. La demanda por irrigación tiende a incrementarse en regiones que sufren un incremento en las temperaturas, debido a la evapotranspiración incrementada y a posibles disminuciones en las lluvias, en tiempos críticos, durante el periodo de crecimiento. Teóricamente, los cultivos pertenecientes a la familia de plantas C₄, requieren menor cantidad de agua por gramo de carbono asimilado que aquellos cultivos de la familia C₃ (Young y Long, 2000). Esto significa que los cultivos como el sorgo y el maíz deben ser más tolerantes al estrés hídrico que otros cereales. Empero, en la vida real, se observa que el maíz sufre daños irreparables debido al estrés hídrico en comparación al sorgo (Doggett, 1988) y; es menos adecuado para condiciones de sequía, debido a su morfología y fisiología. Interesantemente, el sorgo es también más tolerante a episodios esporádicos de escasez de agua que el maíz. Existe evidencia de que los rendimientos de la soya son afectados tanto por escasez de agua temprana como tardía, durante el periodo de crecimiento (Jones, *et al.*, 1985) y; por lo tanto, podría ser importante la disponibilidad de agua uniforme durante todo el proceso de crecimiento.

1.1.3 Efectos del viento

Siguiendo a WMO, 2010, el viento puede afectar a los cultivos, bosques, animales y suelo, teniendo un impacto directo en la productividad y sostenibilidad de los sistemas de producción. Para la mayoría de los cultivos, el viento es un importante regulador de la evapotranspiración y modificador de la estructura del dosel. La ocurrencia de un viento moderado relativamente constante es beneficiosa para el control de virus y enfermedades en cultivos como la papa (Mercer, *et al.*, 2004), pero estos aspectos son muy difíciles de capturar de manera precisa por la mayoría de los modelos, como en el caso de los modelos utilizados en este estudio, en los que los efectos del viento en las pestes y enfermedades no son considerados. Sin embargo, en áreas con estrés por frío (heladas), el viento magnifica este

problema. El impacto del viento ocasional y eventos extremos de ráfagas de viento, tendrán diferentes impactos que aquellos causados por el viento continuo de largo tiempo. Altas velocidades del viento en periodos cortos ocasionan que la planta sea arrancada o destruida, mientras que vientos continuos de larga duración (entre 7 y 15 m/s), pueden causar deformación de los cultivos o crecimiento atrofiado. En áreas donde el suelo es pobremente estructurado y dominado por limo o arena fina, el viento continuo igual o mayor a 10 m/s puede causar erosión. En resumen, los dos tipos de impactos son: i) altas velocidades del viento en periodos cortos (huracanes, tormentas tropicales, ráfagas, tornados, entre otros) y; ii) cambios en la velocidad del viento en periodos largos (incremento o reducción progresiva pero pequeña en la velocidad promedio del viento o cambio en la distribución de su dirección). En situaciones donde el viento afecta las tasas de secado y el contenido de agua en el suelo –que, a su vez, influirá la producción y rendimiento de los cultivos y demanda de agua– el efecto del viento debe ser considerado, pero debe ser capturado en términos del cambio en las tasas de evapotranspiración. En áreas donde el viento tendrá un efecto devastador (zonas de monzón o en el Caribe), es necesario al menos interpretar los resultados de los modelos matemáticos de cultivos en términos de la probabilidad de una pérdida total de los rendimientos de los cultivos, a causa de estos eventos extremos.

1.1.4 Radiación fotosintéticamente activa (PAR)

De acuerdo a WMO, 2010, la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés, Photosynthetically Active Radiation), es la proporción de radiación solar (alrededor de 50%) que activa la fotosíntesis (longitudes de onda entre 0,4 y 0,7 μm). Monteith, 1977, establece que el crecimiento de la biomasa puede expresarse como una función de PAR, la fracción de PAR interceptada por el follaje (fPAR), la eficiencia del uso de la radiación (RUE) y el tiempo. En términos de la fotosíntesis, es el número de fotones por unidad de área y por unidad de tiempo; lo que es importante porque todos los fotones en PAR tienen una habilidad similar de impulsar las reacciones de la luz en la fotosíntesis (Finkele, *et al.*, 2004). Definiciones similares y fórmulas han sido definidas en la serie de modelos matemáticos de cultivos incluidos en el software DSSAT, para simular el comportamiento de los cultivos. El tema principal que considerar –cuando se simulan los impactos del cambio climático que ocasionan cambios en el PAR– es saber si la planta o cultivo está creciendo en condiciones de irradiancia saturada o no. Si la planta o cultivo permanece en condiciones de irradiancia saturada, entonces un cambio en PAR no tendrá ningún efecto. De todas maneras, si PAR disminuye al punto que la fotosíntesis de la planta o cultivo se relacione con la densidad de flujo de fotones, será necesario capturar esta situación en el modelo matemático aplicado. La naturaleza de la relación entre la densidad de flujo de fotones, fotosíntesis y la cantidad de energía requerida para llevar a cabo la fotosíntesis, está definida por el tipo o familia de planta (particularmente C_3 o C_4) y; también, es específica por la variedad de cultivo. Para monocultivos y forrajes de manejo intensivo, existe la necesidad de considerar la competencia de las plantas por luz, si se toma en cuenta al cambio climático; pero para la agricultura que es sostenible por ecosistemas “semi - naturales” (porque ya existe una intervención del ser humano), el cambio en la competencia por la luz (PAR) es muy importante, así como las interacciones con los nutrientes provenientes del CO_2 y la disponibilidad de agua.

1.1.5 Efectos de las concentraciones de CO₂ elevadas

Siguiendo a WMO, 2010, es ampliamente reconocido que la concentración elevada de CO₂ en la atmósfera tendrá un “efecto fertilización” en las plantas y cultivos, incrementando su biomasa, posiblemente su rendimiento por hectárea, pero no necesariamente la calidad del cultivo. Los efectos directos de las concentraciones elevadas de CO₂ en la productividad de las plantas son substanciales. En condiciones ideales, la fotosíntesis puede incrementarse en +30 a +50% para las plantas de la familia C₂ y de +10 a +25% para plantas de la familia C₄ (Aisworth y Long, 2005). Sin embargo, tales incrementos no se traducen fácilmente en la productividad de los cultivos. En el mundo real, condiciones del suelo, disponibilidad de nutrientes, plagas y enfermedades y la competencia de las hierbas malas y otros cultivos, hacen que estos rendimientos sean aún menores. En este sentido, experimentos con cultivos desarrollados en Cámaras Enriquecidas con Altas Concentraciones de CO₂ (FACE), sugieren que, al duplicar la cantidad de CO₂ en la atmósfera, se aumentarían los rendimientos de trigo y arroz de +10 a +15%; y de las papas, en +30% (Derner, *et al.*, 2003). Por otra parte, las pasturas muestran un incremento de +15 a +20% en su productividad (Nowak *et al.*, 2004).

Similarmente, resultados positivos se obtienen para muchas especies forestales – especialmente de las variedades comerciales– si es que se complementan con fertilizantes (Wittig, *et al.*, 2005). Interesantemente, muchos bio - combustibles potenciales tales como el *miscanthus* y el sauce, también incrementan su rendimiento bajo altas concentraciones de CO₂ (Veteli, *et al.*, 2002). Existe menos confianza en que cualquier incremento en el rendimiento de los cultivos automáticamente se traduzca en incrementos de la calidad de nutrientes; algunos experimentos muestran reducciones en los nutrientes minerales y en el contenido de proteínas (Wu, *et al.*, 2003). Para el periodo 2010 a 2030, se estima que los rendimientos se incrementarán para muchos cultivos (CSCDGC, 2002): arroz en +15%; algodón, en +19%; trigo, en +15%; maíz, en +8%; remolacha, en +8% y; tomate, en +12%.

En promedio, se espera un incremento promedio de +17% en el rendimiento de todos los cultivos cuando las concentraciones de CO₂ en la atmósfera alcancen las 500 partes por millón (ppm) (Long, *et al.*, 2004), fenómeno que es muy probable que suceda antes del 2050, según las proyecciones de diferentes escenarios de cambio climático. Sin embargo, un enfoque tan simplista de la modelización del impacto es inaceptable en situaciones en las que los recursos no se manejan intensivamente; más específicamente, para pastoreo abierto y pasturas naturales. En estas situaciones, la elevada concentración de CO₂ es probable que cause cambios en la calidad de los alimentos disponibles para el pastoreo (por ejemplo, el contenido de proteína) y los tipos de alimento (cambios en las comunidades de plantas, o hierbas malas) (Ehleringer, *et al.*, 2002). De hecho, los factores de fertilización del CO₂ utilizados en modelos matemáticos antiguos para proyectar rendimientos futuros, fueron derivados de estudios realizados en recintos controlados hace aproximadamente 20 años. Estudios más recientes, que utilizan la tecnología de Enriquecimiento de CO₂ en Ambientes Libres de Aire (FACE, por sus siglas en inglés, Free Air Concentration Enrichment), han facilitado pruebas a larga escala de los cultivos más utilizados, bajo condiciones de elevada concentración de CO₂. En estos experimentos, las altas concentraciones de CO₂ incrementaron los rendimientos de los cultivos en una menor proporción que los estudios más antiguos (menos del 50% de los anteriores estudios). Esto arroja serias dudas sobre las proyecciones de que el aumento del CO₂ compensará completamente las pérdidas debidas al cambio climático; por lo tanto, los modelos matemáticos de cultivos podrían estar

sobrestimando los efectos positivos del CO₂. En este sentido, una revisión de los efectos del CO₂ en las plantas, especialmente en su fotosíntesis, se puede encontrar en Long, *et al.*, 2006; Tubiello, *et al.*, 2007; Ainsworth, *et al.*, 2007 y 2008. Por otra parte, mientras que los impactos mayores como el estrés térmico y la sequía pueden compensar la influencia del CO₂ en las comunidades de plantas en el trópico y climas semi-áridos y del Mediterráneo, un cambio en la comunidad de las plantas y de la calidad de los alimentos, debe ser capturado cuando se modelan sistemas de pastoreo extensivamente manejados en condiciones de clima templado. Las interacciones cambiantes de la comunidad de plantas, probablemente, se extenderá a plagas y enfermedades y la interacción de concentraciones elevadas de CO₂ y temperaturas más calientes, probablemente resultará en pérdidas en los rendimientos de cultivos mucho más elevadas (Stacey y Fellows, 2002). Independientemente de los beneficios teóricos del CO₂ en la agricultura y bio-recursos, las influencias secundarias del cambio climático –como, por ejemplo, los cambios en las temperaturas y precipitaciones– serán, en la mayoría de los casos, contraproducentes. Sin embargo, el grado en que estas influencias secundarias contrarrestarán los efectos positivos directos de la fertilización de CO₂, no está del todo claro –se necesita mayor y mejor investigación en el tema– y es difícil establecer cuál de las influencias predomina en los rendimientos de los cultivos. Este resultado es también probable que varíe espacialmente, así como para cultivos específicos y prácticas de manejo local diferentes. Ciertamente, mayores temperaturas extenderán el periodo de crecimiento en latitudes medias, fenómeno que ya puede ser aparentemente observado en la actualidad (Sweeney, *et al.*, 2002). Esto incrementa substancialmente los rendimientos potenciales de los cultivos en latitudes más altas y, a su vez, permite que el margen de producción agrícola se mueva a latitudes más altas (norte y sur, más lejanas a la línea del Ecuador). Por último, el daño por heladas será substancialmente reducido en algunas zonas (Howden, 2003). Mayor calor en el verano también inducirá a mayor nivel de estrés por calor.

2. Métodos y materiales

2.1 Modelos matemáticos de cultivos CERES y CROPGRO

Diversos estudios sobre el impacto del cambio climático en la agricultura han sido realizados utilizando diferentes clases de modelos matemáticos, desde los llamados “top-down” hasta los llamados “bottom-up”. Ellos proporcionan una primera indicación de los diferentes tipos de impactos a esperar y; por lo tanto, son los métodos de análisis más efectivos para implementar en este campo. Los impactos potenciales en la oferta mundial de alimentos han sido estimados para diferentes escenarios socioeconómicos de cambio climático. Es el caso del trabajo realizado por Mendelsohn, *et al.* (2006), que utiliza una metodología Ricardiana del tipo “top-down”, que muestra que algunas regiones mejorarán su producción agrícola, mientras que otras sufrirán pérdidas en términos de rendimientos por hectárea; causando, en última instancia, efectos distributivos entre países pobres y ricos (en vías de desarrollo o desarrollados, respectivamente) y; por lo tanto, se requerirá de una reorganización de la producción agrícola a nivel mundial.

Por otra parte, algunos estudios del tipo “bottom-up” también han sido desarrollados, como el trabajo realizado por el IFPRI (2009), utilizando los modelos matemáticos de cultivos CERES y CROPGRO, contenidos en el software DSSAT, observándose resultados muy

similares, pero a una escala diferente (a escala continental). El estudio cuantifica los impactos del cambio climático provenientes del escenario A2 con y sin el efecto fertilización del CO₂ (escenarios climáticos desarrollados por dos Modelos de Circulación Global “GCM”, del National Center for Atmospheric Research de Estados Unidos “NCAR” y, del Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization de Australia (CSIRO)). El modelo NCAR muestra incrementos en la temperatura de +2 a +3.5 grados centígrados para el periodo 2000 – 2050; mientras que los incrementos en el modelo CSIRO son aún mayores (+3 a +5 grados centígrados) para Bolivia. Los patrones de precipitación para Latinoamérica son similares para ambos modelos, con incrementos de +10 a +100 mm por año. En este sentido, los impactos esperados para la soya a secano en la región pueden variar de -2.6 a +4.2% para el escenario A2, sin efecto fertilización del CO₂ y; de +19.1% para el mismo escenario, considerando el efecto fertilización del CO₂. Por otro lado, para el maíz a secano, las reducciones en el rendimiento varían de -1.9 a -0.4% para el escenario A2 aislado, mientras que para el escenario A2 más el efecto fertilización del CO₂, se espera incrementos en el orden de +0.4 a +2.2%. Otros estudios, como el realizado por Parry, *et al.*, 2004 utilizando los mismos modelos matemáticos de cultivos, cuantifican los impactos del cambio climático en la producción mundial de cereales (maíz, arroz, trigo y soya) a un nivel de promedio por país. El cambio porcentual en los rendimientos promedio de los cereales para el escenario climático A2 del modelo del Hadley Center en el Reino Unido – “HADCM2” para Bolivia– se encuentra alrededor de -10%. En el mencionado estudio, el cambio climático aislado (sin efecto fertilización del CO₂) ocasiona una reducción de los rendimientos de -2 a -30% para Bolivia en el corto y largo plazo, respectivamente, para los escenarios A2 y B2.

Por otra parte, cuando se introduce adicionalmente al efecto fertilización del CO₂, las variaciones en los rendimientos de los cereales oscilan entre -2.5% en el corto plazo a +2.5% en el largo plazo para el escenario A2, mientras que para el escenario B2 se observa una disminución de -2.5%. Sin embargo, estos resultados siguen siendo muy generales y se observa la necesidad de tener resultados con un mejor nivel de detalle o mayor escala espacial, dadas las diferentes zonas agroecológicas existentes dentro de Bolivia (desde los Andes hasta la Amazonía). En este sentido, los modelos matemáticos de cultivos utilizados en este estudio son el CROPGRO para la soya y el CERES para el maíz, que son calibrados y validados para las condiciones locales antes de realizar el análisis de impacto del cambio climático. La elección de estos modelos se debe a que los mismos han sido relativamente bien utilizados y testeados en un rango de diferentes condiciones ambientales y agroecológicas. La serie de modelos CROPGRO y CERES está incluida en el sistema de modelaje DSSAT v.4 (Tsuji, *et al.*, 1994; Hoogenboom, *et al.*, 1999), desarrollado originalmente por el International Consortium for Agricultural System Applications (ICASA). En este sentido, existen modelos de simulación para la soya y el maíz, respectivamente, que describen el desarrollo fenológico diario, tal como la duración de las etapas de crecimiento, crecimiento vegetativo y reproductivo de las partes de la planta, crecimiento de hojas y ramas, senescencia de las hojas, producción de biomasa y partición entre las partes de la planta y la dinámica de su sistema de raíces. Los modelos incluyen sub - módulos para simular el balance de agua y de nitrógeno en el suelo y en las plantas, y estos tienen la habilidad de simular los efectos de la deficiencia de nitrógeno y déficit de agua en el proceso de la fotosíntesis y el movimiento de los carbohidratos del suelo a la planta. En resumen, como primer paso, se cuantifican los impactos del cambio climático aislados para diferentes zonas, introduciendo variaciones en cada uno de los componentes o parámetros

climáticos (temperatura, precipitación, radiación solar, concentración de CO₂, entre otros). Seguidamente, como segundo paso, se introducen los efectos combinados en la serie de modelos matemáticos de cultivos, utilizando los escenarios SRES A2 y B2 del IPCC, para el corto y largo plazo, con y sin el efecto fertilización del CO₂.

2.2 Modelos matemáticos de cultivos CERES y CROPGRO aplicados para Bolivia

Muchos modelos de cultivos han sido desarrollados para explorar los impactos del cambio climático en la producción de alimentos y posibles medidas de adaptación a escalas globales, nacionales y regionales. Sin embargo, existen muchas fuentes de incertidumbre en tales estudios, incluyendo posibles emisiones de Gases con Efecto Invernadero, GHG (por sus siglas en inglés “Green House Gass Emissions”), y las diferencias entre los diferentes escenarios de cambio climático generados por varios Modelos de Circulación Global (General Circulation Models, GCM’s). De la misma manera, existe incertidumbre con respecto al uso de modelos matemáticos de cultivos a nivel parcela para la estimación de la producción agrícola en grandes áreas. Esto surge de los desfases de escala entre los modelos de cultivo específicos de parcela, los GCM’s y los resultados de los Modelos de Circulación Regional (Regional Circulation Models, RCM’s), y la producción agrícola regional. La mayoría de los modelos de cultivos está diseñada para representar la producción a nivel parcela, como es el caso de los modelos CERES y CROPGRO; esto crea dificultades en la predicción de los impactos del cambio climático a nivel regional, a no ser que se adopten algunos supuestos para poder ampliar la escala de los resultados. El enfoque convencional para los estudios de impacto del cambio climático ha sido, o bien, correr los modelos para diferentes sitios y luego ampliar la escala de los resultados a nivel regional o; de lo contrario, modelar los rendimientos regionales, utilizando tipos de suelo, variedades de cultivos y prácticas de manejo representativas y específicas de la región de estudio, lo cual ha sido aplicado en el presente estudio. Como menciona Xiong, *et al.*, 2008, todos los modelos de cultivos deben ser calibrados y validados en el ambiente de interés, si se quiere que los resultados sean sólidos. La calibración del modelo engloba la minimización del error entre los resultados del modelo y los datos observados. Además, incluye la determinación de los parámetros del modelo matemático para algún propósito en particular. La validación de estos modelos evalúa la habilidad de un modelo calibrado para simular las características de una diferente base de datos. La evaluación regional del impacto del cambio climático, el área geográfica y los datos observados limitados, usualmente confinan a la calibración a utilizar los resultados de experimentos de campo ya sea de: i) estaciones agrícolas experimentales o; ii) variedades más comúnmente sembradas en la zona de estudio. En la mayoría de los casos, la selección de los sitios de calibración puede ser más bien arbitraria e influenciada por la disponibilidad de datos, más que por una verdadera representación de prácticas regionales o de una heterogeneidad espacial. Por las razones mencionadas, las cinco principales zonas productivas de Santa Cruz – Bolivia, fueron seleccionadas y analizadas, tomando en cuenta las variedades de cultivos y prácticas de manejo más aplicadas. En este sentido, el proceso de calibración y validación es resumido en las siguientes secciones¹.

¹ Una revisión completa del proceso de calibración y validación para el arroz, maíz y soya, puede ser encontrada en Viscarra, 2010.

2.2.1 Calibración

Para el proceso de calibración del modelo matemático CROPGRO – Soya, fueron utilizados los experimentos de campo del CIAT – Bolivia para la campaña 2001/2002 en Okinawa 1 y Saavedra. Partiendo de la variedad M GROUP 9, disponible en el modelo matemático CROPGRO y siguiendo la metodología de calibración mencionada en los manuales de DSSAT (Hoogenboom, *et al.*, 1999), los parámetros genéticos fueron calibrados (tanto vegetativos, como reproductivos). Se tomó en cuenta la variedad mencionada para poder crear la nueva variedad específica de UIRAPURU, que es la más utilizada en Bolivia. Por otra parte, para el proceso de calibración del modelo matemático CERES – Maize, fueron utilizados los experimentos de campo conducidos por el CIAT – Bolivia en la campaña 2001/2002 para las localidades de Mairana y Gutierrez. Partiendo de la variedad SUWAN – 1, disponible en el modelo matemático CERES, y siguiendo la metodología mencionada en los manuales de DSSAT (Hoogenboom *et al.*, 1999), se calibraron los parámetros genéticos (tanto vegetativos, como reproductivos). Se tomó en cuenta la mencionada variedad para poder crear la nueva variedad específica de SUWAN – Saavedra, que es la más utilizada en Bolivia.

A estos datos de campo se sumó la información diaria de las estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), donde se registran: temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y radiación solar. También se tomó en cuenta los datos del suelo físicos y químicos obtenidos de las bases de datos del CIAT – Bolivia. Con este bagaje de información, se alcanzaron los siguientes resultados para la calibración:

Tabla 1

Simulación del rendimiento después de la calibración para la soya

Variedad UIRAPURU para la SOYA					
Zona de Produccion		Okinawa 1		Saavedra	
		Observado	Simulado	Observado	Simulado
Campana 2001/2002	Floracion (Días Despues de Siembra)	49	48	47	47
	Madurez Fisiologica (Días Despues de Siembra)	126	118	127	123
	Peso de 100 granos (gr)	12.4	14.22	13	15.47
	Rendimiento (Kg/ha)	2890	3331	2270	2516

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo matemático de cultivos CROPGRO – Soybeans.

Tabla 2

Simulación del rendimiento después de la calibración para el maíz

Variedad SUWAN-Saavedra para el MAIZ					
Production Zone		San Pedro		Mairana	
		Observado	Simulado	Observado	Simulado
2001/2002 Campaign	Floracion Masculina (Dias Despues de Siembra)	57	62	72	66
	Floracion Femenina (Dias Despues de Siembra)	59	64	74	68
	Numero de Mazorcas por 100 Plantas	117	139	120	155
	Rendimiento (Kg/ha)	4038	3685	4806	3775

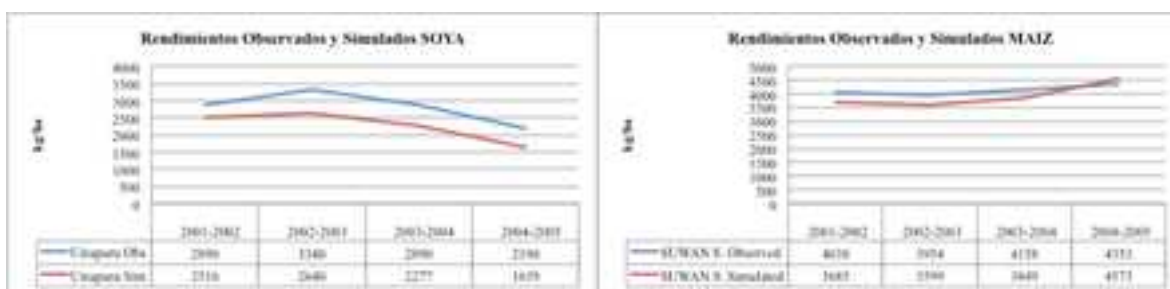
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo matemático de cultivos CERES – Maize.

Los datos simulados, son muy cercanos a los datos de campo observados en el trabajo realizado por el CIAT – Bolivia, lo que significa que los modelos matemáticos CROPGRO – Soya y CERES – Maiz, se comportan muy bien para las condiciones locales de Bolivia con las nuevas variedades específicas calibradas.

2.2.2 Validación

Para validar los modelos, fueron utilizados los experimentos de campo llevados a cabo por el CIAT – Bolivia en Okinawa 1 para la soya y en San Pedro para el maíz. Estos datos fueron obtenidos de los Reportes Técnicos Anuales para las campañas 2001/2002, 2002/2003, 2003/2004 y 2004/2005, con las variedades UIRAPURU y SUWAN – Saavedra, considerando todos los datos de manejo, tales como: fecha de siembra, aplicación de fertilización, condiciones de suelo, factores climáticos locales, entre los principales. Los resultados del proceso de validación fueron los siguientes:

Figura 1. Rendimientos observados y simulados para la soya y el maíz.

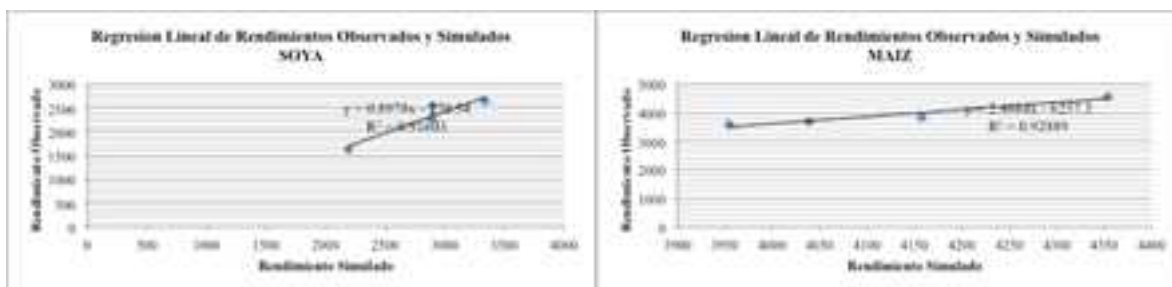


Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo matemático de cultivos CROPGRO – Soybeans y CERES – Maize.

En la Figura 1 se puede observar que todos los rendimientos simulados con las variedades calibradas siguen la misma tendencia de las variedades observadas en el trabajo de campo realizado por el CIAT – Bolivia para las diferentes campañas seleccionadas, que son diferentes de la campaña de calibración. Sin embargo, para una validación más robusta, Jones y Kiniry, 1986, utilizan técnicas de regresión de la fórmula $y = a + bx$, donde la variable dependiente son los resultados simulados y la variable explicativa son los resultados observados en campo. En este sentido, se obtiene un buen desempeño cuando el intercepto del modelo (a) se acerca a 0 y la pendiente de la regresión (b) se acerca a 1, indicando una

relación casi perfecta entre los resultados observados y simulados. Los resultados de la regresión para la soya y el maíz en el presente estudio fueron los siguientes:

Figura 2. Regresión lineal de rendimientos observados y simulados para soya y el maíz.



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo matemático de cultivos CROPGRO – Soybeans y CERES – Maize.

La Figura 2 muestra las regresiones para el maíz con un intercepto de -6257 (menor a 0), y una pendiente de 2.46 que se acerca a 1 y un R^2 de 0.93 (el porcentaje de variación que es contabilizado por el modelo); esto muestra un buen desempeño en la capacidad de predicción del modelo. Por otro lado, la regresión para la soya muestra un intercepto de -270 (menor a 0), y una pendiente de 0.89 que se acerca a 1, y un R^2 de 0.92, resultados que también muestran un muy buen desempeño en la capacidad de predicción del modelo. Complementariamente a este análisis de regresión, de acuerdo a Jones y Kiniry, 1986, el coeficiente de correlación de Pearson, Kendall y/o Spearman, puede ser aplicado a los rendimientos observados y simulados indicando similitud directa o inversa de una respuesta en y por una respuesta en x. Los resultados son presentados en la Tabla 3.

Tabla 3
Coefficientes de correlación del maíz y de la soya

MAÍZ: Coeficientes de Correlación de Pearson, Kendall y Spearman				SOYA: Coeficientes de Correlación de Pearson, Kendall y Spearman					
Correlaciones				Correlaciones					
		SuwanObs	SuwanSim			Uirapuru Observado	Uirapuru Simulado		
SuwanObs	Correlación de Pearson	1	.964*	Uirapuru Observado	Correlación de Pearson	1	.857*		
	Sig. (bilateral)		.036		Sig. (bilateral)		.043		
	N	4	4		N	4	4		
SuwanSim	Correlación de Pearson	.964*	1	Uirapuru Simulado	Correlación de Pearson	.957*	1		
	Sig. (bilateral)	.036			Sig. (bilateral)	.043			
	N	4	4		N	4	4		
* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).				* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).					
Correlaciones				Correlaciones					
		SuwanObs	SuwanSim			Uirapuru Observado	Uirapuru Simulado		
Tau-b de Kendall	SuwanObs	Coefficiente de correlación	1,000	1,000*	Tau-b de Kendall	Uirapuru Observado	Coefficiente de correlación	1,000	.873
		Sig. (bilateral)					Sig. (bilateral)		.371
		N	4	4			N	4	4
	SuwanSim	Coefficiente de correlación	1,000**	1,000	Uirapuru Simulado	Coefficiente de correlación	.313	1,000	
		Sig. (bilateral)					Sig. (bilateral)		.371
		N	4	4			N	4	4
Rho de Spearman	SuwanObs	Coefficiente de correlación	1,000	1,000**	Rho de Spearman	Uirapuru Observado	Coefficiente de correlación	1,000	.849
		Sig. (bilateral)					Sig. (bilateral)		.381
		N	4	4			N	4	4
	SuwanSim	Coefficiente de correlación	1,000**	1,000	Uirapuru Simulado	Coefficiente de correlación	.349	1,000	
		Sig. (bilateral)					Sig. (bilateral)		.381
		N	4	4			N	4	4
* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).				* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).					
** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).				* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).					

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo matemático de cultivos CROPGRO – Soybeans y CERES – Maize y análisis estadístico en el paquete SPSS.

La Tabla 3 muestra que las variedades SUWAN – Saavedra y UIRAPURU observadas y simuladas, para el maíz y la soya, respectivamente, están altamente correlacionadas. Esto significa que los modelos calibrados y validados, están muy ajustados a los datos de campo observados y; por lo tanto, pueden ser utilizados para realizar un análisis de impactos en las condiciones locales de las áreas de estudio.

2.2.3 Áreas de estudio para el análisis de impactos

Después de conocer la base científica de la relación entre las plantas y el medio ambiente y, de la misma manera, teniendo los modelos matemáticos para la soya y el maíz calibrados y validados, se eligieron tres zonas de producción agrícola en Bolivia, localizadas en el Departamento de Santa Cruz, para de esta manera poder cuantificar los impactos del cambio climático y efecto fertilización del CO₂ en los rendimientos de los cultivos, con una mejor escala de resolución. Fueron seleccionadas tres zonas de producción por su importancia en términos de cantidad de grano, las mismas que se diferencian en clima y suelos, capturando de esta manera, los efectos de diferentes zonas agroecológicas. Las zonas seleccionadas son Mineros, Pailón y San Julián; sus principales características son detalladas en la Tabla 4:

Tabla 4

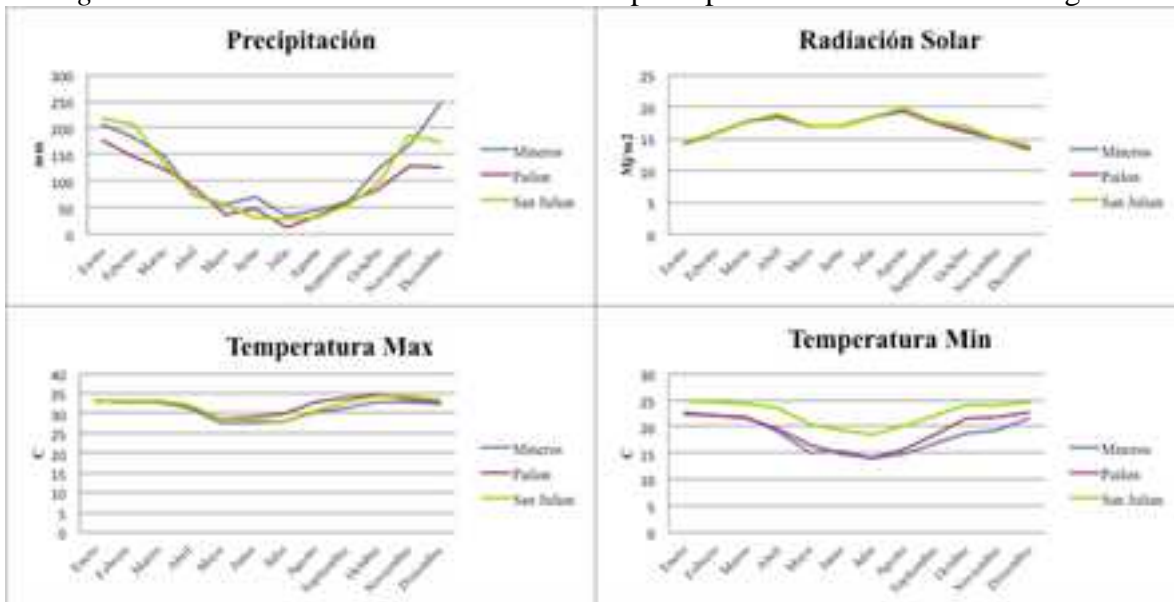
Principales zonas de producción de soya y maíz en Santa Cruz – Bolivia

Zona de Producción	Obispo Santistevan	Ñuflo de Chavez	Chiquitos
Estación Meteorológica	Mineros	San Julián	Pailón
Latitud	17°06'36"Sur	16°45'00"Sur	17°38'00"Sur
Longitud	63°14'30"Oeste	62°30'00"Oeste	62°14'00"Oeste
Elevación (m)	245 m.s.n.m	305 m.s.n.m.	279 m.s.n.m.
Precipitación Anual Promedio	1370,8	1280,9	1063,6
Temperatura Máxima Promedio (C)	30,985	31,775	32,142
Temperatura Mínima Promedio (C)	18,417	22,533	19,225

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Estaciones Meteorológicas del SENAMHI.

En la Tabla 4 se pueden observar las principales características climáticas de las diferentes zonas de producción elegidas, utilizando los datos diarios de las estaciones meteorológicas del SENAMHI de 2001 a 2007. Mineros es la zona más húmeda, con una precipitación anual promedio de 1370.8 mm, pero, a su vez, esta zona tiene la temperatura máxima más baja de las tres (30.9 grados centígrados). Por su parte, San Julián es la zona intermedia en términos de humedad, mostrando la segunda más alta precipitación anual (1280.9 mm) y la segunda temperatura máxima más alta (31.7 grados centígrados). Finalmente, Pailón es la zona más seca con solamente 1063.6 mm de lluvia al año, pero a su vez cuenta con la temperatura máxima más alta (32.1 grados centígrados). En la Figura 3 se muestra la distribución mensual promedio de las precipitaciones, radiación solar, temperatura máxima y mínima en las tres diferentes zonas de producción. La precipitación, la temperatura máxima y la mínima promedio son cuantificadas utilizando los datos diarios de las estaciones meteorológicas del SENAMHI (2001 a 2007), mientras que la radiación solar es estimada utilizando la metodología de Allen *et al.* (1998), donde los datos necesarios son: locación (latitud y longitud), día del año y cantidad de horas de luz solar directa.

Figura 3. Distribución media mensual de los principales indicadores meteorológicos.



Fuente: Elaboración propia con base en datos de estaciones meteorológicas del SENAMHI y siguiendo a Allen et al., 1998.

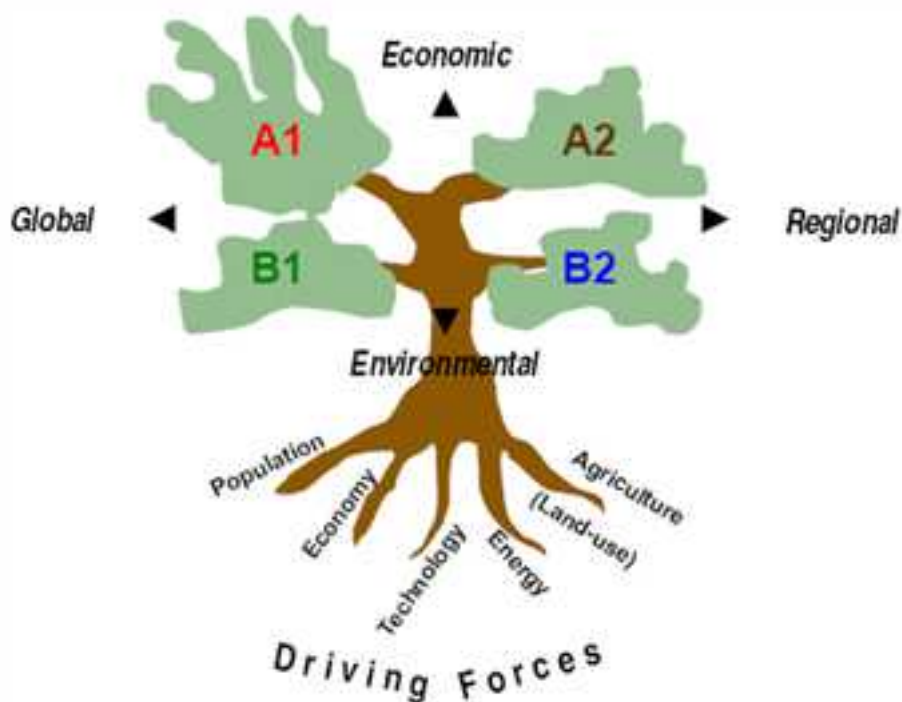
Como se observa en la Figura 3, los meses lluviosos comienzan en octubre y terminan en marzo, llegando al umbral entre diciembre y enero con diferentes cantidades entre las tres diferentes zonas. Las temperaturas son casi constantes durante todo el año, pero el ambiente es más caliente de septiembre a marzo; en tanto que las temperaturas mínimas se alcanzan entre abril y agosto.

2.3 Escenarios de emisiones del IPCC

Los escenarios se diferencian de las estimaciones o proyecciones, dado que las últimas extrapolan patrones pasados al futuro. Las descripciones de los escenarios pretenden ser internamente consistentes, coherentes y capaces de describir posibles estados futuros del mundo (IPCC, 2001). Estos, usualmente, cubren un rango de futuros alternativos. Las causas principales pueden ser económicas, sociales, institucionales, administrativas y culturales (Nakicenovic, *et al.*, 2000). En este sentido, el IPCC desarrolló una serie de escenarios de emisiones de gases con efecto invernadero GHG. Estos proporcionan cambios de alta resolución en las variables climáticas, tales como temperatura, radiación solar y precipitación, que son resultantes de estos escenarios alternativos. Estos escenarios están basados en diferentes perfiles de desarrollo socioeconómico mundial, en términos de gobernanza y orientación hacia temas sociales y ambientales, así como de otros valores prevalecientes. Estos son subsecuentemente revisados y actualizados, para considerar cambios en las metodologías y también en el entendimiento de las causas de las emisiones, incluyendo cambios en la comprensión de la intensidad del carbono u oferta de energía; la brecha de ingresos entre países desarrollados y en desarrollo y; las futuras tasas de emisiones de diferentes gases GHG y sulfuro (Nakicenovic, *et al.*, 2000). Sin embargo, recientemente, otro tipo de escenarios están en desarrollo; son los llamados patrones de concentración

representativos, RCPs (por sus siglas en inglés, Representative Concentration Pathways) (Moss, *et al.*, 2010). Estos patrones, en lugar de empezar con escenarios socioeconómicos que dan lugar a emisiones de gases GHG, describen nuevos escenarios que toman futuros alternativos en las concentraciones globales de gases GHG y aerosoles, como punto de partida. Los escenarios RCPs pueden ser utilizados en paralelo con los escenarios SRES pero, en el presente estudio, solamente los escenarios SRES son utilizados, debido a su disponibilidad a escala detallada y principalmente por motivos comparativos con estudios previos.

Figura 4. Escenarios SRES del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).



Fuente: Extraído de Nakicenovic et al., 2000.

Este conjunto de escenarios de emisiones es conocido como los Escenarios SRES del IPCC, los que han sido ampliamente utilizados para evaluar los impactos del cambio climático y opciones de mitigación y/o adaptación. Las familias o ramas de estos escenarios pueden ser resumidos de la siguiente manera:

- Escenario A1: Un mundo materialista y consumista, en el cual existe una creciente globalización y convergencia, desarrollo económico rápido e innovación tecnológica uniforme.
- Escenario A2: Un mundo muy heterogéneo, con una población continuamente creciente y una orientación mundial dirigida regionalmente; el mismo que es más fragmentado y lento en comparación con el escenario A1.

- Escenario B1: Un mundo convergente, con cambios rápidos en la estructura económica hacia los servicios e información; con una reducción en la intensidad material y; la introducción de tecnologías limpias y eficientes en el uso de recursos.
- Escenario B2: Un mundo próspero y justo, en el cual, como resultado de la orientación general hacia el desarrollo sostenible, se producen tasas relativamente bajas de emisiones de gases GHG.

En el presente estudio, dos posibles escenarios de cambio climático son utilizados: el pesimista A2, y el optimista B2, para los periodos 2001 – 2030 (20s) → Corto Plazo, y para 2071 – 2100 (70s) → Largo Plazo. Las principales características socio – económicas son mostradas a continuación:

Tabla 5
Características de los escenarios SRES de cambio climático A2 y B2

Indicador	A2	B2
Crecimiento Poblacional	Alto	Medio
Crecimiento del PIB	Medio	Medio
Uso de Energía	Alto	Medio
Cambio de Uso de Suelo	Medio / Alto	Medio
Disponibilidad de Recursos	Bajo	Medio
Velocidad y Dirección del Cambio Tecnológico	Lento	Medio
Cambio hacia:	Regional	"Dinamica de Siempre"

Fuente: Elaborado a partir de Nakicenovic *et al.*, 2000.

Tabla 1
Principales Indicadores Económicos y Ambientales

Emissions Scenario	Global Population (Billions)	Global GDP ¹	Per Capita Income Ratio ²	CO2 Concentration (ppm)	Global Δ Temperature (°C)	Global Sea - Level Rise (cm)
1990	5.3	21	16.1	354	0	0
2000	6.1 - 6.2 ³	25 -28 ³	12.3 - 14.2 ³	367 ⁴	0.2	2
2050						
SRES A2	11.3	82	6.6	536	1.4	16
SRES B2	9.3	110	4	478	1.4	16
2100						
SRES A2	15.1	243	4.2	857	3.8	42
SRES B2	10.4	235	3	615	2.7	36
¹ Gross Domestic Product (trillion 1990 US\$ per year) ² Ratio of development countries and economies in transition (UNFCCC - defined Annex I) to developing countries (Non - Annex I) ³ Modeled range across the six illustrative SRES scenarios ⁴ Observed 1999 value (Prentice <i>et al.</i> , 2001)						

Fuente: Extraído de IPCC, 2007.

Los dos escenarios fueron elegidos tomando en cuenta su alta resolución disponible en Bolivia. Estos datos vienen de una reducción de un Modelo de Circulación Regional (RCM) llamado PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies). Este RCM está basado en el sistema de modelaje del Hadley Center en el Reino Unido; se utiliza para generar información de alta resolución sobre el cambio climático para cualquier región del planeta.

El Programa Piloto Departamental de Adaptación al Cambio Climático utilizó los escenarios A2 y B2 para generar escenarios de cambio climático regionales para todo el país, en los siguientes periodos: 1961 – 1990, 2001 – 2030 y 2071 – 2100, utilizando la metodología de Seiler, 2009. La metodología considera un modelo climático anidado, con resultados de un Modelo de Circulación Global (GCM) océano – atmósfera, llamado ECHAM4 (rango de grillas de 250 km aproximadamente), el cual es utilizado para crear un RCM de alta resolución (rango de grillas de 25 km aproximadamente) para Bolivia. PRECIS toma los resultados del Modelo ECHAM4 como límites laterales, heredando las características de gran escala del Modelo ECHAM4. Tiene la ventaja de poseer una resolución espacial mucho mayor, tanto espacialmente (25 km), como temporalmente (datos diarios); un mejor detalle espacial (topografía) y; una mejor capacidad de simulación para eventos climáticos extremos.

Como se explicó anteriormente, los impactos del cambio climático en la agricultura vienen de una combinación de efectos positivos y negativos; estos efectos son cuantificados utilizando los escenarios del IPCC reducidos y desarrollados para Bolivia por Seiler, 2009.

Los escenarios A2 y B2 son utilizados; siendo A2 un escenario “business as usual” o todo sigue igual con altas emisiones de gases GHG y; B2 un escenario con menores emisiones, considerando una sociedad más orientada a lo “verde y sostenible”. Ambos otorgan un rango plausible de impactos del cambio climático en el futuro, reduciendo de esta manera la incertidumbre. Las variaciones promedio mensuales de la temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y radiación solar, son introducidas en el escenario base que cuenta con datos meteorológicos observados diariamente (2001 – 2007), para el corto (2000 – 2030) y largo plazo (2070 -2100). Finalmente, para el análisis de impacto del clima aislado, las concentraciones de CO₂ se mantienen constantes a 330 partes por millón (ppm). Asimismo, para el análisis de impactos del clima en conjunto con el efecto fertilización del CO₂, se consideran diferentes concentraciones siguiendo a Nakicenovic, *et al.*, 2000:

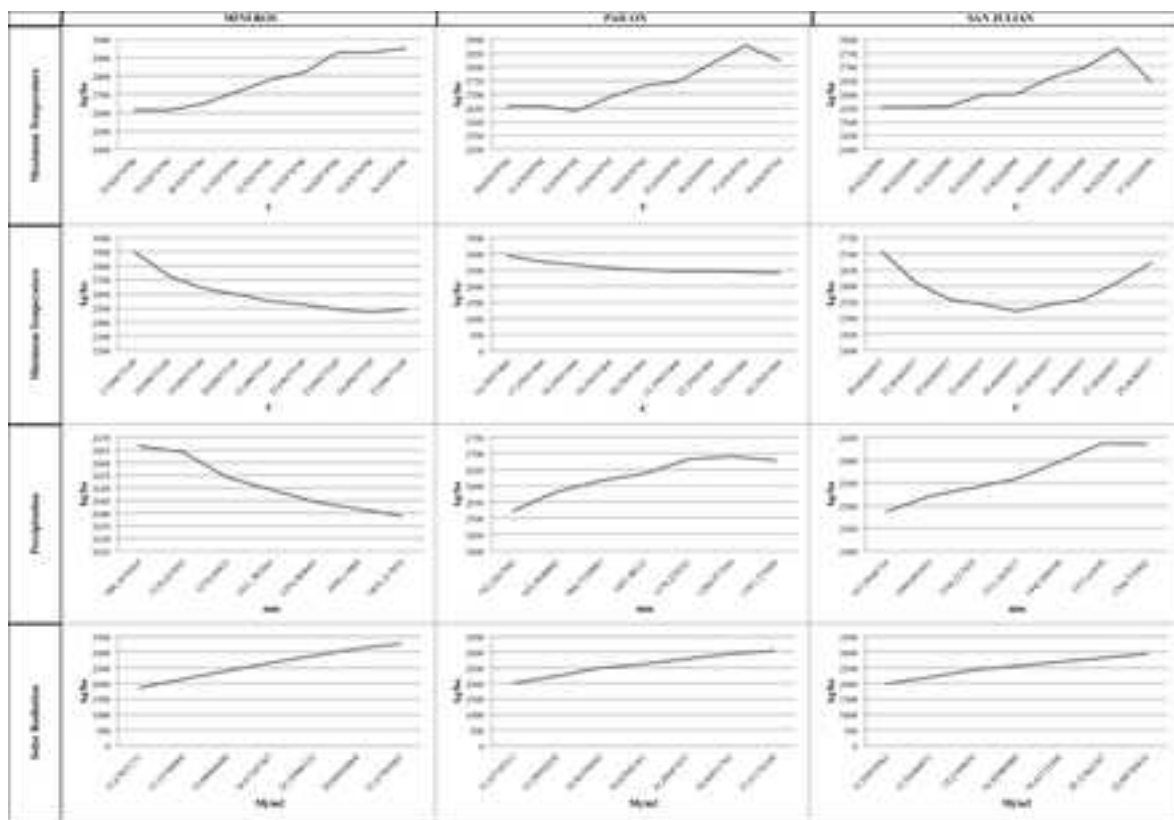
- Escenario Base “Baseline” → 330 ppm.
- A2 20s → 536 ppm.
- A2 70s → 857 ppm.
- B2 20s → 478 ppm.
- B2 70s → 615 ppm.

Finalmente, los resultados obtenidos en esta etapa son comparados con los resultados de otros estudios realizados a escalas con una menor resolución espacial.

3. Resultados y discusión

3.1 Impactos aislados de la temperatura, precipitación y radiación solar

Figura 5. Impactos del Cambio Climático Aislados en la SOYA (C₃).

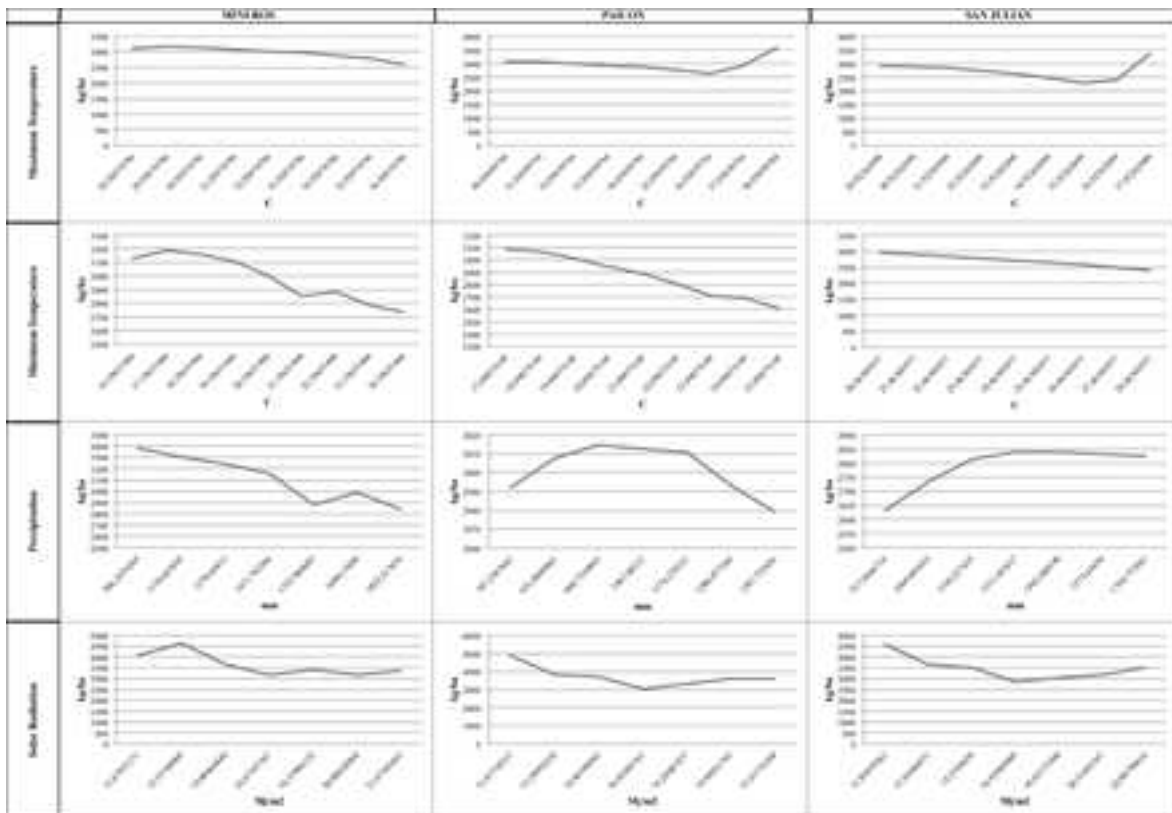


Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo CROPGRO – Soybeans calibrado y validado para Bolivia.

- **Temperatura Máxima:** Los incrementos en la temperatura máxima son positivos para todas las zonas de producción, solamente cuando se cuenta con la suficiente disponibilidad de agua. En los lugares más calientes (como es el caso de Pailón y San Julián), los beneficios se convierten en pérdidas a partir de los 37 grados centígrados. Por lo tanto, de acuerdo a los resultados del modelo, temperaturas más altas que 37 grados centígrados, son contraproducentes para los rendimientos de la soya.
- **Temperatura Mínima:** Incrementos en la temperatura mínima, son contraproducentes para los rendimientos de la soya en todas las áreas de producción, dado que estas temperaturas son alcanzadas en la noche. Sin embargo, cuando las temperaturas mínimas alcanzan los 24 grados centígrados, la pendiente de la curva cambia. Como se esperaba, al aumentar la temperatura por las noches, se producen reducciones en el rendimiento de la soya.
- **Precipitación:** Incrementos en las precipitaciones son contraproducentes para las zonas más húmedas (como es el caso de Mineros) pero; para las zonas más secas, estos incrementos tienen efectos positivos, hasta que la zona se convierte en demasiado húmeda (1,200 a 1,500 mm al año). Por otra parte, como se esperaba, una reducción en las precipitaciones ocasiona una reducción en los rendimientos de la soya.

- Radiación Solar: Incrementos en la radiación solar para todas las zonas de producción de soya tienen un efecto positivo en los rendimientos, dado que este cultivo pertenece a la familia de plantas C₃.

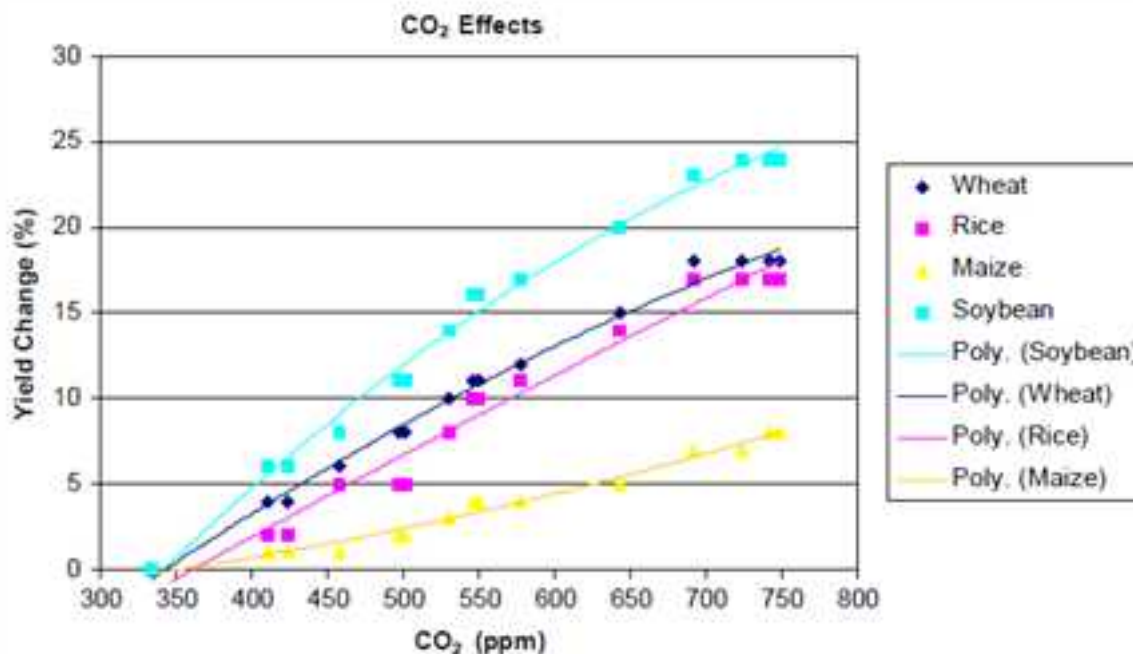
Figura 6. Impactos del cambio climático aislados en el maíz (C4).



Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo CERES – Maize calibrado y validado para Bolivia.

- Temperatura Máxima: Incrementos en la temperatura máxima son contraproducentes para todas las áreas. Sin embargo, cuando las temperaturas son mayores a 37 grados centígrados, los resultados del modelo muestran un pequeño incremento en los rendimientos de los cultivos.
- Temperatura Mínima: Incrementos en la temperatura mínima van también en detrimento de los rendimientos del maíz en todas las áreas; la temperatura mínima más alta que el maíz puede tolerar es de 17 grados centígrados; con mayores temperaturas mínimas, el maíz sufre de estrés por calor.
- Precipitación: Incrementos de las precipitaciones en las zonas más húmedas son contraproducentes para los rendimientos del maíz (Mineros). Sin embargo, estos incrementos, tienen un efecto positivo en áreas más secas como Pailón y San Julián. La cantidad de lluvia óptima para el maíz está alrededor de los 1,000 mm por año. De acuerdo a los resultados del modelo, el maíz es menos resiliente al estrés por agua que la soya.
- Radiación Solar: Incrementos en la radiación solar, tienen un efecto negativo en los rendimientos del maíz para todas las áreas en contraste con la soya. Esto se puede explicar porque el maíz pertenece a la familia de plantas C₄.

Figura 7. Resumen de los efectos probables del CO₂ en los rendimientos de diferentes cultivos.



Fuente: Extraído de Parry, et al., 2003.

- Efecto Fertilización del CO₂: Incrementos en las concentraciones de CO₂ son positivos para todos los cultivos pero, como se observa en la Figura 7, dentro de los cultivos observados, el trigo, el arroz y la soya, pertenecen a la familia de plantas C₃; mientras que el maíz pertenece a la familia de plantas C₄. Como se esperaba, las plantas C₃ son las que más se benefician por las mayores concentraciones de CO₂. La Figura 7 es extraída del Godard Institute for Space Studies (GISS) de la NASA, cuyos autores utilizaron diferentes artículos científicos que aplicaron los modelos matemáticos de cultivos CERES y CROPGRO, para poder desarrollar el gráfico. Sin embargo, como se explicó antes, estos impactos son muchas veces sobrestimados y los beneficios netos del CO₂, en la realidad, pueden ser mucho más modestos.

3.2 Impactos del cambio climático conjunto

Los resultados obtenidos de los escenarios de cambio climático A2 y B2 del IPCC, introducidos en la serie de modelos CERES y CROPGRO para el maíz y la soya, respectivamente, se muestran en las Tablas 7 y 8, y la Figura 8:

Tabla 7

Variaciones e impactos promedio del cambio climático para la soya y el maíz, en las diferentes zonas de producción

Impactos del Cambio Climático Promedio en Mineros					Rendimiento de la Soya en Mineros				Rendimiento del Maíz en Mineros			
Mineros	Radiación Solar	Temp Max	Temp Min	Precipitación	CC	CO2	CC %	CO2 %	CC	CO2	CC %	CO2 %
Baseline	16,7	31,0	18,4	1419,3	2601,4	2601,4	0,00	0,00	3361,7	3361,7	0,00	0,00
A220s	17,3	30,7	22,2	1478,2	2670,3	3603,0	0,03	0,39	3593,7	3939,9	0,07	0,13
A2 70s	17,3	34,7	23,8	1765,5	2440,9	3688,3	-0,06	0,42	3138,7	3562,7	-0,07	-0,06
B2 20s	17,4	30,6	22,1	1434,7	2662,6	3456,3	0,02	0,31	3677,0	3938,9	0,09	0,17
B2 70s	17,4	33,2	24,5	1631,3	2631,0	3897,9	0,01	0,42	3687,7	3803,6	0,09	0,16
Impactos del Cambio Climático Promedio en Pailón					Rendimiento de la Soya en Pailón				Rendimiento del Maíz en Pailón			
Mineros	Radiación Solar	Temp Max	Temp Min	Precipitación	CC	CO2	CC %	CO2 %	CC	CO2	CC %	CO2 %
Baseline	16,6	32,1	19,2	1063,6	2464,6	2464,6	0,00	0,00	3273,0	3273,0	0,00	0,00
A220s	17,1	30,5	22,1	1468,0	2463,9	3475,1	0,00	0,41	3342,9	3881,4	0,02	0,19
A2 70s	17,5	34,7	23,8	1075,1	2029,3	3372,7	-0,18	0,37	2454,7	3071,6	-0,23	-0,06
B2 20s	17,2	30,5	21,9	1434,7	2444,1	3291,4	-0,01	0,32	3041,4	3431,4	-0,07	-0,05
B2 70s	17,4	33,0	24,3	1600,5	2250,6	3385,4	-0,09	0,37	2636,7	3186,9	-0,19	-0,01
Impactos del Cambio Climático Promedio en San Julián					Rendimiento de la Soya en San Julián				Rendimiento del Maíz en San Julián			
Mineros	Radiación Solar	Temp Max	Temp Min	Precipitación	CC	CO2	CC %	CO2 %	CC	CO2	CC %	CO2 %
Baseline	16,9	31,8	22,5	1280,9	2588,3	2588,3	0,00	0,00	3309,4	3309,4	0,00	0,00
A220s	18,1	31,1	22,4	1317,7	2686,4	3610,6	0,02	0,39	2710,3	2998,4	-0,18	-0,09
A2 70s	18,3	35,3	26,0	1532,1	2200,6	3536,4	-0,13	0,37	2711,3	3145,6	-0,17	-0,05
B2 20s	18,1	31,0	22,2	1301,4	2644,4	3437,9	0,02	0,33	2800,0	2984,9	-0,15	-0,10
B2 70s	18,3	33,7	24,6	1436,8	2197,6	3247,7	-0,15	0,35	2974,6	3218,4	-0,10	-0,03

Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo CROPGRO – Soybean y CERES – Maize calibrado y validado para Bolivia.

- **Mineros:** Se espera un incremento del +1 al +3% para los escenarios A2 y B2, y una reducción del -6% en el escenario A2 para el largo plazo. Esto se puede explicar porque en el corto plazo, la temperatura máxima será constante y existirá un incremento de solamente 3 grados centígrados para el escenario B2 y 4 grados centígrados para el escenario A2. Además, la precipitación y la radiación solar también serán incrementadas, aumentando de esta manera los rendimientos de los cultivos. Finalmente, cuando se introduce el efecto fertilización proveniente de la concentración de CO₂, el incremento en los rendimientos es mucho mayor (+33 a +42%). En este sentido, el maíz experimentará un incremento para todos los escenarios, excluyendo el escenario A2 70s, donde se observa que la precipitación y radiación solar es demasiado elevada, siendo contraproducente en los rendimientos de los cultivos.
- **Pailón:** Para esta zona, los resultados son muy similares para la soya, manteniendo los rendimientos casi constantes para ambos escenarios, en el corto plazo. Sin embargo, en el largo plazo, se observan reducciones de -9 a -18%. Esto se puede explicar porque Pailón es una zona más seca que Mineros. Por otra parte, cuando se aplica el efecto fertilización del CO₂, se observa un incremento para todos los escenarios, pero en una menor magnitud que en el caso de Mineros (de +32 a +41%). Mientras que, para el maíz, se observa una reducción para todos los escenarios (de -7 a -25%); solamente el escenario A2 20s muestra un moderado incremento (+2%), lo cual puede ser explicado por el incremento moderado en la precipitación y la radiación solar.
- **San Julián:** En el corto plazo, se observa un moderado incremento para los escenarios A2 y B2 (+2%), dado que la temperatura permanecerá casi constante y, adicionalmente, se observa un incremento en la precipitación. Por otra parte, en el largo plazo, las temperaturas serán mas altas (con incrementos de hasta 5 grados centígrados), y también habrá un leve

incremento en la precipitación, causando en última instancia una disminución de los rendimientos de la soya, de alrededor de -15%. Por otro lado, el rendimiento del maíz en esta zona muestra las pérdidas más grandes (de -10 a -18%), dado que se observa un incremento muy grande de la radiación solar (el más alto de entre las tres zonas de producción analizadas). En este sentido, los impactos son menores en el largo plazo, porque existe un pequeño incremento de los rendimientos a causa de un moderado incremento en las temperaturas, que es beneficioso para el maíz hasta que se alcanza el umbral de temperatura de 37 grados centígrados. Con temperaturas máximas más elevadas, se esperan reducciones en el rendimiento del maíz.

Figura 8. Impacto del cambio climático promedio, en los rendimientos de la soya y el maíz, a nivel departamental.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo CROPGRO – Soybean y CERES – Maize calibrado y validado para Bolivia.

Como se puede observar en la Figura 8, algunos cultivos y algunos lugares se beneficiarán con el cambio climático, mientras que otros se verán perjudicados. Sin embargo, en general, el impacto neto promedio del cambio climático en la producción agrícola de Santa Cruz, sin considerar el efecto fertilización del CO₂, será levemente beneficioso para la soya en el corto plazo (incrementos de +1 a +2%), pero negativo en el largo plazo (reducciones de -8 a -12%). Por otra parte, al considerar los efectos del CO₂, los impactos observados son positivos, con incrementos de +33 a +40% en los rendimientos por hectárea de la soya. Por su parte, la producción de maíz se verá severamente afectada en el escenario sin efecto fertilización del CO₂, con reducciones de -3 a -16%; los impactos más severos son esperados para el largo plazo. Finalmente, cuando se incluye el efecto del CO₂, se observa un pequeño incremento en los rendimientos del maíz para todos los escenarios (de +3 a +8%), pero en el escenario A2 70s, se muestra una reducción de -2% para el rendimiento del maíz.

Tabla 8

Variaciones de los rendimientos simulados para la soya y el maíz, comparados con resultados de estudios previos

Cultivo	Soya				Maíz			
	A2 CC	A2 CO2	B2 CC	B2 CO2	A2 CC	A2 CO2	B2 CC	B2 CO2
DSSAT Bolivia	(-12, +2)	(+38, +40)	(-8, +1)	(+33, +35)	(-16, -3)	(-2, +8)	(-7, -4)	(+3, +4)
Parry, et al., 2004	(-30, -2)	(-2.5, +2.5)	(-30, -2)	(-2.5, +2.5)	(-30, -2)	(-2.5, +2.5)	(-30, -2)	(-2.5, +2.5)
Gerald, et al., 2009	(-2.6, +4.2)	(+19)	-	-	(-1.9, -0.4)	(+0.4, +2.2)	-	-

Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo CROPGRO – Soybean y CERES – Maize calibrado y validado para Bolivia, así como datos extraídos de Parry et al., 2004 y Gerald et al., 2009.

En la Tabla 8, los resultados de las simulaciones del presente estudio (DSSAT Bolivia) son comparados con los resultados obtenidos por otros estudios con menor resolución espacial. Estas simulaciones se encuentran dentro del rango de resultados de dichos estudios, pero se debe recalcar que el estudio realizado por Parry, *et al.*, 2004, muestra un rendimiento promedio de un grupo de cereales (maíz, trigo, arroz y soya), lo que introduce incertidumbre adicional en los resultados. Por su parte, los resultados de Gerald, *et al.*, 2009, son obtenidos por cultivos individuales, pero su resolución espacial es muy general, con resultados que muestran la variación esperada en el rendimiento de cultivos para toda Latinoamérica y El Caribe (considerados como una sola región), algo que también crea incertidumbre en los resultados.

4. Conclusiones

Después de correr el modelo para impactos individuales o aislados, así como para impactos combinados, se puede concluir que los rendimientos de la soya en Bolivia son más resilientes a incrementos en la temperatura máxima y reducciones en las precipitaciones, mientras que estos son más reactivos a altas concentraciones CO₂. Por otra parte, el maíz parece ser muy sensible a incrementos en radiación solar y precipitaciones, menos resiliente al estrés por altas temperaturas y menos reactivo a las concentraciones de CO₂. Estos resultados pueden ser extendidos a los cultivos que pertenecen a la misma familia –C₃ para la soya y C₄ para el maíz–, dadas sus características similares en el proceso de fotosíntesis y evapotranspiración. Para comparar tales diferencias, se realiza un análisis de impacto en los rendimientos de la soya y del maíz, considerando al cambio climático y también al efecto fertilización del CO₂. Como la soya pertenece a la familia de cultivos C₃, se observa que el efecto positivo del CO₂ excede los impactos negativos del cambio climático para todas las zonas de producción estudiadas. Los incrementos en sus rendimientos fluctúan entre +30 y +40%, en comparación a los impactos del escenario de cambio climático aislado. Mientras que el maíz, al pertenecer a la familia de cultivos C₄, tiene beneficios mucho más modestos al considerar el efecto fertilización del CO₂, siendo solamente de +7 a +15% mejores que el escenario de cambio climático aislado. Los efectos positivos del CO₂ son mayores en el corto plazo, dado que existe menor incremento de las temperaturas y mayor disponibilidad de agua. Sin embargo, los efectos positivos de la fertilización del CO₂ pueden estar siendo sobrestimados, como lo muestran los experimentos de campo FACE. La combinación de temperaturas más altas con una menor disponibilidad de agua puede ser devastadora, como se observa en las zonas de estudio más secas (Pailón y San Julián). Por otra parte, con mayores temperaturas y una

mayor disponibilidad de agua, se pueden observar algunos beneficios provenientes del cambio climático; por lo tanto, el manejo y control eficiente del agua es crucial para poder incrementar los rendimientos de los cultivos como medida de adaptación al cambio climático.

Finalmente, las relaciones medio ambiente – cultivo, así como la base teórica del cambio climático y del efecto fertilización en los cultivos, fueron confirmados por los resultados obtenidos en las simulaciones de la serie de modelos matemáticos de cultivos CROPGRO y CERES calibrados y validados para Bolivia. Estos resultados, se encuentran dentro de los rangos de los resultados de otros estudios realizados para Bolivia y para Latinoamérica, con el beneficio adicional de que estos son obtenidos a una escala más detallada, proveniente de los SRES escenarios reducidos del IPCC (mayor resolución espacial) y; también, debido a que se realiza un análisis individual para cada cultivo y para las zonas de producción más importantes en nuestro país. Esto es muy importante para cuantificar los impactos del cambio climático, y acortar la brecha que separa a la ciencia de la toma de decisiones políticas a una escala regional, donde es muy necesaria la aplicabilidad de los resultados.

5. Bibliografía

- Ainsworth, E.A. y Long, S.P. (2005). What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analysis of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, (165), 351–372.
- Ainsworth, E. A. y Rogers, A. (2007). The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising (CO₂): mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell and Environment*, (30), 258-270.
- Ainsworth, E.A., Leakey, A.D.B., Ort, D.R., Long, S.P. (2008). FACE-ing the facts: inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO₂] impacts on crop yield and food supply. *New Phytol*, (179), 5–9.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). “Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56”. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1998.
- Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S. y Palutikof, J. (2008). Climate Change and Water. Technical Paper, Intergovernmental Panel on Climate Change., Geneva: IPCC Secretariat, 2008.
- Center for the Study of Carbon Dioxide and Global Change. (2002). *Plant Growth Data*. Recuperado de http://www.co2science.org./data/plant_growth/plantgrowth.php.
- Derner, J.D., Johnson, H.B., Kimball, B.A., Pinter, H.W., Polley, C.R. y Tischler, T.W. (2003). Above- and below-ground responses of C₃– C₄ species mixtures to elevated CO₂ and soil water availability. *Global Change Biology*, (9), 452–460.

- Doggett, H. (1988). *Sorghum*. Harlow, Essex, Reino Unido: Longman Scientific and Technical. Second edition.
- Droogers, P., van Dam, J., Hoogeveen, J. y Loeve, R. (2004). Adaptation strategies to climate change to sustain food security. En J.C. Aerts and P. Droogers (eds), *Climate Change in Contrasting River Basins. Adaptation Strategies for Water, Food and Environment* (pp 49-74). Wallingford, Reino Unido: CABI publishing.
- Ehleringer, J.R., Cerling, T.E. y Dearing, M.D. (2002). Atmospheric CO₂ as a global change driver influencing plant-animal interactions. *Integrative and Comparative Biology*, (42), 424-430.
- Finkele, K., Jones, M.B. y Clifton-Brown, J.C. (2004) Surface energy balance. En Keane T. y Collins J.F. (eds.), *Climate, Weather and Irish Agriculture*. Dublin, Reino Unido: AgMet.
- International Food Policy Research Institute. (2009). *Climate Change, Impact on Agriculture and Costs of Adaptation*. Recuperado de http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/rome2007/docs/Impact_on_Agriculture_and_Costs_of_Adaptation.pdf
- Hoogenboom, G., Wilkens, P. W., Tsuji, G. Y. (1999). *DSSAT*, 3 (4).
- Howden, S.M., Meinke, H., Power, B. y McKeon, G.M. (2003) Risk management of wheat in a non-stationary climate: frost in Central Queensland. En D.A. Post (Ed.) *Integrative Modelling of Biophysical, Social and Economic Systems for Resource Management Solutions. Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation, 17–22 July 2003*. Townsville, Australia.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Recuperado de <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/index.php?idp=0>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Recuperado de http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html
- Jones, P., Jones, J.W. y Allen, L.H. Jr. (1985) Seasonal carbon and water balances of soybeans grown under CO₂ and water stress treatments in sunlit chambers. *Trans. ASAE*, (28), 2021–2028.
- Jones, C.A., y Kiniry, J.R. (1986). CERES-Maize: A simulation model for maize growth and development. College Station, Estados Unidos: Texas A&M University Press.

- Kukla, G. y Karl, T.R. (1993). Nighttime warming and the greenhouse effect. *Environmental Science and Technology*, (27), 1468-1474.
- Lawlor, D.W. y Mitchell, R.A.C. (2000). Crop ecosystem responses to climate change: wheat. En K.R. Reddy y H.F. Hodges (eds.) *Climate Change and Global Crop Productivity*. Wallingford, Reino Unido: CABI.
- Long, S.P., Ainsworth, E.A., Rogers, A. y Ort, D.R. (2004). Rising atmospheric carbon dioxide: Plants face the future. *Annu. Rev. Plant Biol.*, (55), 591–628.
- Long, S. P., Ainsworth, E. A., Leakey, A. D. B., Nosberger, J. y Ort, D. R. (2006.). Food for Thought: Lower than Expected Crop Yield Stimulation with Rising CO₂ Concentrations. *Science*, (312), 1918–1921.
- Mendelsohn, R., Dinar, A. y Williams, L. (2006). The Distributional Impact of Climate Change on Rich and Poor Countries. *Environment and Development Economics*, (11), 1-20.
- Mercer, P.C., Dowley, L.J., Doohan, F., Dunne R. y Moore, J.F. (2004). Influence of weather on diseases and pests of crop plants. En Keane T. y Collins J.F. (eds.), *Climate, Weather and Irish Agriculture*. Dublin, Reino Unido: AgMet.
- Monteith, J.L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B., Biological Sciences*, (281), 277–294.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D.P., y Wilbanks, T.J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, (463), 747-756. doi:10.1038/nature08823
- Nakicenovic, N. *et al.* (2000). *Special Report on Emission Scenarios*. Londres, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Nowak, R.S., Ellsworth, D.S. y Smith, S.D. (2004). Tansley review: Functional responses of plants to elevated atmospheric CO₂ – Do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? *New Phytologist*, (162), 253–280.
- Olesen, J.E., Jensen, T., Petersen, J. (2000). Sensitivity of field scale winter wheat production in Denmark to climate variability and climate change. *Clim Res*, (15), 221–238.
- Parry, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Fischer, G. y Livermore, M. (1999). Climate change and world food security: A new assessment. *Global Environ. Change*, (9), S51-S67.
- Parry, M., Rosenzweig, M., Iglesias, A., Livermore, C. y Fischer, C. (2004). Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environ. Change*, (14), 53–67.

- Seiler, C. (2009). *Implementation and Validation of a Regional Climate Model for Bolivia*. Fundación Amigos de la Naturaleza (FAN-Bolivia).
- Stacey, D.A. y Fellows, M.D.E. (2002). Influence of elevated CO₂ on interspecific interactions at higher trophic levels. *Global Change Biology*, (8), 668–678.
- Sweeney, J., Donnelly, A., McElwain, L. y Jones, M. (2002). *Climate Change: Indicators for Ireland*. Johnstown Castle, Irish Environmental Protection Agency.
- Tubiello, F.N., J.S. Amthor, K.J. Boote, M. Donatelli, W. Easterling, G. Fischer, R.M. Gifford, M. Howden, J. Reilly, and C. Rosenzweig. 2007. *Crop response to elevated CO₂ and world food supply - A comment on "Food for Thought..." by Long et al.*, Science 312 : 1918-1921, 2006. *European Journal of Agronomy* 26:215-223.
- Tsuji, G.Y., Jones, J.W., Hoogenboom, G., Hunt, L.A., y Thornton, P.K. (1994). Introduction. En Tsuji, G.Y., Uehara, G. y Balas, S. (eds.). *DSSAT version 3. A Decision Support System for Agrotechnology Transfer. Volume 1* (pp. 1-11). Honolulu, Estados Unidos: University of Hawaii.
- Veteli, T.O., Kuokkanen, K., Julkunen-Tiitto, R., Roininen, H. y Tahvanainen, J. (2002). Effects of elevated CO₂ and temperature on plant growth and herbivore defensive chemistry. *Global Change Biology*, (8), 1240–1252.
- Viscarra, F.E. (2010). Calibration and Validation of CERES and CROPGRO Crop Models for Rice, Maize and Soybeans in Santa Cruz, Bolivia. Adaptation to Climate Change Departmental Pilot Program. Fundación Amigos de la Naturaleza (FAN-Bolivia).
- Wittig, V.E., Bernacchi, C.J., Zhu, X., Calfapietra, C., Ceulemans, R., DeAngelis, P., ... y Long, S.P. (2005). Gross primary production is stimulated for three *Populus* species grown under free-air CO₂ enrichment from planting through canopy closure. *Global Change Biology*, (11), 644–656.
- World Meteorological Organization. (2010). *Guide to Agricultural Meteorological Practice*. WMO-No. 134. Recuperado de http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/gamp/gamp_en.php
- Wu, D.X., Wang, G.X., Bai, Y.F. y Liao, J.X. (2004). Effects of elevated CO₂ concentration on growth, water use, yield and grain quality of wheat under two water soils levels. *Agric. Ecosyst. Environ.*, (104), 493–507.
- Xiong, W., Holman, I., Declan, C., Erda, L., y Yue, L. (2008). A crop model cross calibration for use in regional climate impacts studies. *Ecological Modeling*, (213), 365-380.
- Young, K.J. y Long, S.P. (2000). Crop ecosystem responses to climate change: maize and sorghum. En Reddy, K.R. y Hodges, H.F. (eds.) *Climate Change and Global Crop Productivity*. Wallingford, Reino Unido: CABI.