

# Análisis de riesgo climático para el sector soberanía alimentaria y ganadería, mediante la aplicación de modelos de impactos biofísicos

## 1. Resumen (español e inglés)

La aplicación de modelos de crecimiento de plantas se utiliza para analizar el desarrollo y productividad de cultivos a nivel espacial y temporal, incluyendo países, regiones y escalas pequeñas como fincas o cuencas hidrográficas. El uso de modelos de simulación está impulsado por la creciente necesidad de evaluar los impactos del cambio climático sobre la producción de alimentos, comprender las brechas de información de rendimiento de cultivos y la seguridad alimentaria, diseñar opciones de adaptación, identificar estrategias de gestión de riesgos, e incorporar modelos de cultivos a la evaluación integrada de las implicaciones políticas. Los modelos de cultivos están diseñados para representar procesos biofísicos entre medio ambiente, manejo del cultivo y genética. Los resultados de la simulación son aplicables para representar grandes áreas de cobertura de cultivo.

EPIC es un modelo de simulación de cultivos, utilizado a nivel mundial para simular el impacto de los sistemas de cultivos sobre la tierra, el agua y el clima. Es un software de código abierto escrito en lenguaje de programación FORTRAN, el uso de procesadores en paralelo es una modificación que se realizó para el procesamiento en un entorno Linux y para hacerlo capaz de simulaciones iterativas sobre una gran cantidad de configuraciones de parámetros.

EPIC opera en un paso de tiempo diario y puede realizar simulaciones a largo plazo. El número total de parámetros de entrada del modelo es más de 300, la mayoría de ellos asociados a un tipo específico de cultivo y régimen de manejo agrícola, pero los valores de algunos parámetros inherentes al modelo deben optimizarse, basado en análisis de sensibilidad previos, para ajustar el desempeño de acuerdo a la naturaleza del cultivo, mediante observaciones de experimentos en campo, como la unidad de calor potencial basada en grados día de desarrollo, la temperatura óptima de cultivo y el índice de cosecha .

Para la calibración se recomienda seleccionar al menos cuatro parámetros para ser ajustados en la simulación. Que representan la heterogeneidad espacial de las características de la fenología del cultivo, características biofísicas, formación de biomasa y manejo de cultivo, los códigos de los archivos que se construyó están descritos en el manual de usuario del modelo EPIC.

Por otro lado, la Zonificación Agroecológica (ZAE), es un modelo que permite definir zonas homogéneas en base a combinaciones de suelo, fisiografía y características climáticas. Los parámetros a modelar se centran en los requerimientos agroecológicos de los cultivos y en los sistemas de manejo bajo los que estos se desarrollan. Cada zona resultante de la ZAE, tienen una combinación similar de limitaciones y potencialidades para el uso de la tierra, sirviendo de referencia para formular recomendaciones que permitan mejorar el uso sostenible del suelo, el incremento de la producción y limitando la degradación de los recursos naturales.

Los resultados obtenidos de la ZAE, sumado a otras capas de información, tales como la tenencia y disponibilidad de tierras, los requisitos nutricionales de las poblaciones, las infraestructuras, costos y precios, ha hecho posible el desarrollo de aplicaciones más avanzadas en el análisis de los recursos naturales y la planificación de usos de tierras.

En este sentido, se propone realizar una simulación por medio de modelos de cultivo que permitan evidenciar impactos que pueden generar las amenazas climáticas sobre el rendimiento, crecimiento e idoneidad de los cultivos, utilizando los modelos EPIC y ZAE.

Para el estudio, en primer lugar, se ubicó geográficamente la distribución de cultivos en las áreas de intersección de celdas climáticas y se obtuvo los sitios de estudio que se identificó con un código particular para cada unidad de análisis.

De la misma manera para las variables de suelo se consideró el diseño con la misma lógica de cultivos. Para la selección de modelos, se

establece un análisis multicriterio sobre los modelos de simulación de cultivo disponible, se considera variables como la escala espacial, la escala temporal y la facilidad de uso y manejo, priorizando aquellos que posean interfaz gráfica e ingreso intuitivo de variables al modelo. Procedente de esta información, se evaluó la disponibilidad de información existente de fuentes primarias o de fuentes secundarias. Para la selección de los cultivos a ser simulados, se tomó en cuenta las variables de ingreso a los modelos de simulación, en este sentido se selecciona variables biofísicas como suelo, clima y genética de cultivo, así como variables de manejo de cultivo, mediante una matriz se proporciona la disponibilidad de información para cada cultivo.

En este estudio, se seleccionó seis cultivos, arroz, maíz amarillo duro, maíz suave seco, papa, fréjol seco y caña de azúcar. Se recopiló para los seis cultivos, los conjuntos de datos e información más completos sobre clima, suelo, y cultivo. Para configurar el modelo de simulación, se establecieron cuadrículas de 10x10 Km con una cobertura espacial de cultivo de al menos el 70%. La información de cultivo, como variables fenológicas y fenométricas, son escasas a nivel temporal, se detallan registros de boletines divulgativos, tesis de grado y ensayos puntuales de tesis de grado.

Para la construcción de los años tipo, se consideran las salidas de los modelos de circulación global CMIP6 de última generación que permiten interpretar cambios en la climatología pasada y futura. La ventaja de usar estos datos es que la secuencia de los patrones de circulación atmosférica está representada en la serie de cada año tipo y permite orientar al tomador de decisión por la familiaridad climatológica del pasado, este reporte se encuentra en el documento «Generación de información de clima futuro a nivel nacional para el periodo 2020–2050 a partir de un análisis de circulación atmosférica y el empleo de modelos climáticos del CMIP6». Para el manejo de los cultivos, se realiza una amplia revisión de bibliografía secundaria, debido a que los entes pertinentes como son INIAP, MAG carecen de información detallada y necesaria para el modelo de simulación. Para los seis cultivos a simular, se evalúa la disponibilidad de información, sobre el rendimiento y fenología.

Para estimar los parámetros de sensibilidad del modelo EPIC, se realiza una corrida preliminar

con los valores por defecto y se evalúa el rendimiento obtenido de la revisión bibliográfica. De acuerdo con el manual de EPIC, las variables más sensibles suelen ser la unidad de calor potencial basada en grados día de desarrollo que están gobernados por la temperatura y la eficiencia de uso de la radiación solar. De esta manera, se parametriza el modelo EPIC para cada cultivo, con la simulación que mejor se ajusta a los datos observados del rendimiento de los cultivos.

Se realizó 1.240 corridas para clima futuro, es decir una corrida para cada año tipo. Se analizó los datos de simulación por cultivo, las salidas de cada simulación se presentan en archivos «.Txt», que son compatibles con cualquier editor de texto y hoja electrónica para poder leer los datos, en total se obtienen 9.063 archivos de los cuales 4.518 archivos se utilizan para caracterizar los rendimientos de los 6 cultivos. De la información de clima recopilado, precipitación y temperatura están disponibles para cada unidad de simulación.

De la información recopilada de suelo, la base de datos entregada no posee información para todas las unidades de simulación en al menos el 70% de estas, no se encuentra información de punto de marchitez permanente, capacidad de campo, saturación y variables de química de suelo como contenido de carbón, pH y densidad aparente, necesarias para operar el módulo de balance hídrico. De la información de manejo de cultivos, no existe una base de datos que contenga los manejos agronómicos de los cultivos a simular, se construyó esta información con fuentes secundarias y ensayos de investigación puntual para años específicos, se obtiene 6 archivos para manejo de cultivo y 6 archivos para rendimientos de cultivo.

Se han obtenido los impactos de las amenazas climáticas sobre los rendimientos de los 6 cultivos, el elemento más sensible resultó ser el estrés térmico debido a la variación de la temperatura a nivel global. Se estima que el comportamiento de la fisiología de los 6 cultivos genere una adaptación natural a la variación de los elementos meteorológicos; sin embargo, se ha evidenciado en las corridas que el arroz, el maíz duro, la papa y la caña presentan escenarios de adaptación y mejores rendimientos en condiciones óptimas para la genética de los cultivos. Los que presentan menor desempeño es el cultivo de fréjol y maíz suave.

## Summary

The application of crop growth models is used to analyze crop growth and productivity at a spatial and temporal level, including countries, regions, and small scales such as farms or watersheds. The use of simulation models is driven by the growing need to assess the impacts of climate change on food and safety production, understand crop yield and food security information gaps, design adaptation options, identify risk management strategies, and incorporate crop models into the integrated assessment of policy implications. Crop models are designed to represent biophysical processes between environment, crop management and genetics. The simulation results are applicable to represent large areas of crop coverage.

EPIC is a crop simulation model, used globally to simulate the impact of cropping systems on land, water, and climate. EPIC is open source software written in the FORTRAN programming language, the use of parallel processors is a modification that was made for processing in a Linux environment and to make it capable of iterative simulations over a large number of parameter settings.

EPIC operates on a daily time step and can run long-term simulations. The total number of input parameters of the model is more than 300, most of them associated to a specific type of crop and agricultural management regime, but the values of some parameters inherent to the model must be optimized, based on previous sensitivity analysis, to adjust the performance according to the nature of the crop, through observations of field experiments, such as the unit of potential heat based on degree days of development, the optimum temperature of cultivation, the harvest index.

EPIC operates on a daily time step and can run long-term simulations. The total number of input parameters of the model is more than 300, most of them associated to a specific type of crop and agricultural management regime, but the values of some parameters inherent to the model must be optimized, based on previous sensitivity analysis, to adjust the performance according to the nature of the crop, through observations of field experiments, such as the unit of potential heat based on degree days of development, the optimum temperature of cultivation, the harvest index.

On the other hand, Agroecological Zoning (ZAE) is a model that allows defining homogeneous zones based on combinations of soil, physiography and climatic characteristics. The parameters to be modeled focus on the agroecological requirements of the crops and the management systems under which they are developed. Each area resulting from the ZAE has a similar combination of limitations and potentialities for land use, serving as a reference to formulate recommendations to improve sustainable land use, increase production and limit the degradation of natural resources.

The results obtained from the ZAE, added to other layers of information, such as land tenure and availability, nutritional requirements of populations, infrastructure, costs and prices, has made possible the development of more advanced applications in the analysis of natural resources and land use planning.

In this sense, it is proposed to carry out a simulation through crop models that allow evidence of impacts that climate threats can generate on the yield, growth and suitability of crops, using the EPIC and ZAE models.

For the study, first, the distribution of crops in the areas of intersection of climatic cells was geographically located and the study sites were obtained that were identified with a particular code for each unit of analysis. as of intersection of climatic cells was geographically located and the study sites were obtained that were identified with a particular code for each unit of analysis.

Six crops were selected: rice, maize, corn, potato, dry beans, and sugar cane. The most comprehensive data sets and information on climate, soil, and crop were collected for all six crops. To set up the simulation model, 10x10 Km grids were established with a crop spatial coverage of at least 70%. Crop information, such as phenological and phenometric variables, are scarce at a temporal level, records of informative bulletins, degree theses and punctual essays of degree theses are detailed.

For the construction of the weather types, the outputs of the latest generation CMIP6 global circulation models are considered, which allow interpreting changes in past and future climatology. The advantage of using these data is that the sequence of atmospheric circulation patterns is represented in the series of each standard year and allows the decision maker to

be guided by past climatological familiarity. This report can be found in the document «Generation of information of future climate at the national level for the period 2020–2050 based on an analysis of atmospheric circulation and the use of climate models from CMIP6». For crop management, an extensive review of secondary bibliography is carried out, because the relevant entities such as INIAP, MAG lack detailed and necessary information for the simulation model. For the six crops to be simulated, the availability of information on yield and phenology is evaluated.

To estimate the sensitivity parameters of the EPIC model, a preliminary run is performed with the default values and the performance obtained from the literature review is evaluated. According to the EPIC manual, the most sensitive variables are usually the unit of potential heat based on development degree days that are governed by temperature and the efficiency of use of solar radiation. In this way, the EPIC model is parameterized for each crop, with the simulation that best fits the observed crop yield data.

1.240 runs were made for future climate, that is, one run for each weather type. Simulation data was analyzed by crop, the outputs of each simulation are presented in “. Txt”, which are compatible with any text editor and spreadsheet to read the data, a total of 9.063 files are obtained, of which 4.518 files are used to characterize the yields of the 6 crops. From the collected weather information, precipitation and temperature are available for each simulation unit.

From the information collected from the soil, the database provided does not have information for all the simulation units in at least 70% of them, there is no information on permanent wilting point, field capacity, saturation and soil chemistry variables. soil such as carbon content, pH and bulk density, necessary to operate the water balance module. From the information on crop management, there is no database that contains the agronomic management of the crops to be simulated, this information was built with secondary sources and punctual research trials for specific years, 6 files are obtained for crop management and 6 files for crop yields.

The impacts of climatic threats on the yields of the 6 crops have been obtained; the most sensitive element turned out to be thermal stress due to the variation in temperature at a global level. It is

estimated that the behavior of the physiology of the 6 crops generates a natural adaptation to the variation of the meteorological elements; however, it has been evidenced in the runs that rice, maize, potato and sugarcane present adaptation scenarios and better yields under optimal conditions for crop genetics. Those with the lowest performance are the cultivation of beans and corn and beans.

## 2. Introducción

La aplicación de modelos de crecimiento de plantas se utiliza para analizar el crecimiento y productividad de cultivos a nivel espacial, incluyendo países, regiones y escalas pequeñas como fincas o cuencas hidrográficas. El uso de modelos de simulación está impulsado por la creciente necesidad de evaluar los impactos del cambio climático sobre la producción de alimentos (Xiong, 2016), comprender las brechas de información de rendimiento de cultivos y la seguridad alimentaria, diseñar opciones de adaptación, identificar estrategias de gestión de riesgos, e incorporar modelos de cultivos a la evaluación integrada de las implicaciones políticas (Angulo, 2014).

Los modelos de cultivos están diseñados para representar procesos biofísicos entre medio ambiente, manejo del cultivo y genética. Los resultados de la simulación son aplicables para representar grandes áreas de cobertura de cultivo. Por ejemplo, con la disponibilidad de un conjunto de datos globales (es decir, fechas de siembra y cosecha de cultivos, fertilizantes, área, clima), se crearon modelos para representar mejor el espacio, la heterogeneidad del manejo agrícola y genotipos de cultivos. Estos modelos incluyen una gestión detallada de los cultivos, opciones y características fisiológicas del cultivo; y requieren cantidades sustanciales de datos para calibrar el modelo para una región en particular (Arunrat, 2018)

La calibración de un modelo es un paso previo a la simulación de cultivos. Para la simulación a escala local, comúnmente se ajusta parámetros seleccionados para que los resultados simulados se aproximen a las observaciones de campo. Cuando se carece de información. a escala regional, muchas veces se ajusta el paso de calibración debido a la falta de datos medidos en campo. Una estrategia de calibración utilizada con frecuencia para simulaciones globales consiste en aplicar parámetros por defecto del modelo, mientras se ajusta algunos parámetros basados en literatura, o variando parámetros

basados en la relación entre el clima y la fenología del cultivo (Liu, 2014).

Otro método común es repetir la simulación con diferentes parámetros (como fechas de siembra) y luego seleccionar los parámetros que alcanzan un criterio dado (p. ej., mayor rendimiento). Un método más complejo consiste en calibrar parámetros seleccionados basados en la observación, encuesta y datos regionales informados, lo que requiere mucho más tiempo de cálculo (Wang, 2014).

La distribución de cultivos en el Ecuador se rige en función a la climatología. La condición astronómica del país, le permite recibir una radiación constante, esto ha provocado una diversidad de pisos climáticos y rangos ecológicos a los que las plantas se han podido adaptar. Históricamente la agricultura en el Ecuador ha sufrido procesos económicos ligados a la racionalidad del productor, más que a condiciones ecológicas de distribución, es así que las políticas agropecuarias han definido el mosaico de cobertura de los sistemas de explotación agrícola, teniendo lógicas de producción capitalista y de subsistencia (Caviedes Cepeda, 2019)

Los principales sistemas de explotación agropecuaria en el Ecuador han trazado la dinámica de producción, como son la caña de azúcar, cacao, banano, floricultura como representantes de la agricultura industrial. En el caso de la agricultura de subsistencia tradicionalmente el arroz, maíz, papa, quinua, fréjol han sido cultivos que se encuentran presentes en el paisaje del Ecuador (Caiza, 2015).

EPIC es un modelo de simulación de cultivos, utilizado a nivel mundial para simular el impacto de los sistemas de cultivos sobre la tierra, el agua y el clima. EPIC cuantifica el rango proyectado del impacto del cambio climático bajo diferentes estrategias de decisión (Versión 0810); el modelo se ha utilizado para simular el crecimiento de planta y la productividad del cultivo (Izaurre, 2007).

EPIC es un software de código abierto escrito en lenguaje de programación FORTRAN, el uso de procesadores en paralelo es una modificación que se realizó para el procesamiento en un entorno Linux y para hacerlo capaz de simulaciones iterativas sobre una gran cantidad de configuraciones de parámetros (Wang, 2014).

Aunque EPIC tiene relativamente una estructura del modelo simple, en comparación con otros modelos de cultivos basados en procesos como APSIM y DSSAT; comprende la mayor parte de los principales procesos que ocurren en el sistema de gestión suelo-agua-atmósfera, como la dinámica del agua, crecimiento de plantas, ciclos de nitrógeno y fósforo, salinidad del suelo y toxicidad por aluminio. EPIC opera en un paso de tiempo diario y puede realizar simulaciones a largo plazo. Tiene ocho módulos principales: generación de clima, crecimiento de cultivo, dinámica de agua y suelo, erosión, ciclo de nutrientes y carbono, temperatura del suelo, labranza y manejo de cultivos. En la rutina de crecimiento del cultivo, el rendimiento del cultivo se estima como una función de la relación biomasa/energía (BE), el índice de cosecha (HI), la densidad de plantación (SD), la radiación fotosintética activa (PAR), el factor de eficiencia del uso de la radiación (RUE) y el déficit de presión de vapor (VPD), y se reduce a través de un factor de estrés en serie (Xiong, 2016).

La biomasa potencial se calcula diariamente a partir de PAR y RUE. Se ajusta la biomasa potencial y biomasa real a través del estrés diario causado por temperaturas extremas, agua y deficiencia de nutrientes o aireación inadecuada. Luego, el rendimiento del cultivo se calcula como una proporción del rendimiento del cultivo sobre el rendimiento real total. La biomasa aérea en la madurez fisiológica está definida por un índice de cosecha (HI) (Xiong, 2016).

El número total de parámetros de entrada del modelo es más de 300, la mayoría de ellos asociados a un tipo específico de cultivo y régimen de manejo agrícola, pero los valores de algunos parámetros inherentes al modelo deben optimizarse, basado en análisis de sensibilidad previos, para ajustar el desempeño de acuerdo a la naturaleza del cultivo, mediante observaciones de experimentos en campo, como la unidad de calor potencial basada en grados día de desarrollo (PHU), la temperatura óptima de cultivo (OT), El índice de cosecha (HI). Para la calibración se recomienda seleccionar al menos cuatro parámetros para ser ajustados en la simulación, PHU, OT, HI, SD. Que representan la heterogeneidad espacial de las características de la fenología del cultivo, características biofísicas, formación de biomasa y manejo de cultivo, los códigos de los archivos que se construyó están descritos en el manual de usuario del modelo EPIC (Xiong, 2016).

En este sentido, se propone realizar una simulación por medio de modelos de cultivo que permitan evidenciar impactos que pueden generar las amenazas climáticas sobre el rendimiento, crecimiento e idoneidad de los cultivos, utilizando los modelos EPIC y ZAE.

### 3. Metodología

#### a. Priorización de cultivos y modelos

La selección de la unidad de análisis se basa en la escala espacial de los datos de clima entregados por el Proyecto Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PLANACC), la cual se encuentra a una resolución de 10x10 Km. Se ubicó geográficamente la distribución de cultivos en las áreas de intersección de celdas climáticas y se obtuvo los sitios de estudio que se identificaron con un código particular para cada unidad de análisis. De la misma manera para las variables de suelo se consideró el diseño con la misma lógica de cultivos. Al final se obtuvo para cada unidad de análisis, suelo, clima y cobertura de cultivo en una base de datos para analizar.

Para la selección del tipo de modelamiento, se establece un análisis multicriterio sobre los modelos de simulación de cultivos disponibles, se consideraron variables como la escala espacial, la escala temporal y la facilidad de uso y manejo; priorizando aquellos que posean interfaz gráfica e ingreso intuitivo de variables al modelo.

El grupo sectorial de seguridad alimentaria y ganadería (SAG); priorizó un grupo de cultivos que son de interés para evaluar, en el contexto de cambio global. Procedente de esta información, se evaluó la disponibilidad de información existente de fuentes primarias o de fuentes secundarias.

Para la selección de los cultivos a ser simulados, se tomó en cuenta las variables de ingreso a los modelos de simulación, en este sentido se selecciona variables biofísicas como suelo, clima y genética de cultivo, así como variables de manejo de cultivo. Mediante una matriz de diagnóstico se proporciona la disponibilidad de información para cada cultivo.

#### b. Simulación de cultivos con modelo EPIC

En este estudio, se seleccionó seis cultivos, arroz, maíz amarillo duro, maíz suave seco, papa, fréjol seco y caña de azúcar. Los datos utilizados para el modelo EPIC incluyen variables de suelo (análisis fisicoquímico), climatología histórica (1985-2015), clima futuro (5 años tipos); manejo de cultivos, rendimiento medido en experimentos de campo o reportados a entidades gubernamentales o de tesis de grado.

Se recopiló para los seis cultivos, los conjuntos de datos e información más completos sobre clima, suelo, y cultivo. Para configurar el modelo de simulación, se establecieron cuadrículas de 10x10 Km con una cobertura espacial de cultivo de al menos el 70%.

La información de cultivo, como variables fenológicas y fenométricas, son escasas a nivel temporal, se detallan registros de boletines divulgativos, tesis de grado y ensayos puntuales de tesis de grado.

Las variables meteorológicas se obtienen a nivel diario (temperatura máxima y mínima, precipitación, radiación solar) para el período 1985–2015 (período de referencia) en formato TSV y NETCDF. Los datos de la climatología fueron proporcionados por PLANACC.

Para la construcción de los años tipo, se consideran las salidas de los modelos de circulación global (GCM) CMIP6 de última generación que permiten interpretar cambios en la climatología pasada y futura. La ventaja de usar estos datos es que la secuencia de los patrones de circulación atmosférica está representada en la serie de cada año tipo y permite orientar al tomador de decisión por la familiaridad climatológica del pasado, este reporte se encuentra en el documento “Generación de información de clima futuro a nivel nacional para el periodo 2020–2050 a partir de un análisis de circulación atmosférica y el empleo de modelos climáticos del CMIP6”.

El suelo, los datos de textura del suelo se obtuvieron del sistema SoilsGrid (FAO) y las propiedades físico – químico se calcularon usando ecuaciones de pedotransferencia de Saxton, 2008.

Para el manejo de los cultivos, se realiza una amplia revisión de bibliografía secundaria, debido a que los entes pertinentes carecen de información detallada y necesaria para el modelo de simulación. En base a tesis de grado, documentos técnicos y divulgativos se construye un archivo de manejo, en esencia con las fechas de siembra, cosecha y aplicaciones de nutrición vegetal y control fitosanitario.

### c. Calibración del modelo EPIC

Para los seis cultivos a simular, se evalúa la disponibilidad de información, sobre el rendimiento y fenología. Si bien se puede cultivar varias veces en el año, se simula una sola época de siembra, durante la estación lluviosa de cada unidad experimental, por ser el período que mayor amenaza produce la climatología.

Para estimar los parámetros de sensibilidad del modelo EPIC, se realiza una corrida preliminar con los valores por defecto y se evalúa el rendimiento obtenido de la revisión bibliográfica. De acuerdo con el manual de EPIC, las variables más sensibles suelen ser la unidad de calor potencial basada en grados día de desarrollo (PHU) que están gobernados por la temperatura y la eficiencia de uso de la radiación solar (RUE). De esta manera, se parametriza el modelo EPIC para cada cultivo, con la simulación que mejor se ajusta a los datos observados del rendimiento de los cultivos (Wang, 2014).

Para determinar la eficiencia o desempeño del modelo se escoge el índice de eficiencia de Nash (NSE) y se apoya en pruebas estadísticas de error como es el error cuadrático medio (RMSE), que calcula la desviación estándar de los residuos (errores de simulación) y el error relativo porcentual (MPE) que calcula el sesgo de error en la simulación; apoyado en el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) tomando como base un valor de 0.7 (D. N. Moriasi, 2007).

Para NSE se estableció un umbral de 0.6 o superior para definir la precisión del modelo; aceptando la corrida de simulación con el mejor valor de NSE.

### d. Simulación de cultivos con modelo ZAE

El modelo consideró la metodología de la ZAE propuesta por la FAO (1997), la cual en base a

combinaciones de variables de suelo, fisiografía y clima; identifica zonas aptas, moderadas, marginales y no aptas para evaluar la aptitud de diferentes cultivos.

Los insumos requeridos para el modelo de simulación ZAE de los cultivos de arroz y caña de azúcar son:

- Requerimientos agroecológicos del cultivo a modelar.
- Información de suelos.
- Información de climática.

El esquema metodológico de la ZAE, se basa en el análisis espacial de los insumos de suelo, relieve y clima; así como la aplicación de los requerimientos agroecológicos por variable para la simulación cartográfica de las condiciones necesarias para el establecimiento de un cultivo. Como resultado del análisis espacial de los insumos cartográficos a través del uso de los requerimientos agroecológicos, se obtienen los siguientes productos preliminares:

*Zonificación biofísica:* crea unidades homogéneas en base a las variables de suelos y relieve, la unidad geomorfológica que representa características homogéneas y a su vez ésta posee características edáficas similares. Los parámetros que interviene en la zonificación biofísica son: 1) Parámetro de relieve: pendiente; y 2) Parámetros de suelos: textura, profundidad efectiva, pH, pedregosidad, drenaje, nivel freático, toxicidad, materia orgánica, salinidad y fertilidad.

*Zonificación agroclimática:* según Campos (1999), Allen (1989) y Chávarri (2004) citados por (Velasco & Pimentel, 2009), los dos elementos más importantes del clima son "la temperatura y la precipitación, por ser altamente condicionantes, el primero de los procesos biológicos y el segundo de la frondosidad de la vegetación y la producción de los cultivos".

Los principales parámetros para determinar la zonificación agroclimática son la temperatura y precipitación; siendo los insumos utilizados los siguientes: 1) Precipitaciones medias anuales (mm) y 2) Temperatura media anual (°C).

*Zonificación agroecológica:* consiste esencialmente en el análisis en conjunto de los resultados de la zonificación biofísica y agroclimática por cuadrante y con el uso de una matriz de combinación, obtener el resultado de las categorías de zonificación según aplique el

grado de aptitud: óptima (O), moderada (M), marginal (m) y no apta (N).

## e. Calibración del modelo ZAE

La calibración del modelo ZAE consiste en lograr el mejor ajuste de todos los parámetros introducidos a través de la validación de un grupo experto o de fuentes secundarias de información relacionadas con la aptitud del cultivo a ser calibrado, esto con el objetivo de que la simulación represente un comportamiento ajustado de las variables de suelo y la variabilidad climática a las necesidades del cultivo en estudio (FAO, 1997).

## 4. Resultados

### a) Gestión de datos y modelos

Mediante la investigación y revisión bibliográfica, para definir cuáles son los modelos de simulación más idóneos para la realidad agropecuaria del Ecuador, se establece que, los modelos de simulación más adecuados en este contexto son el Modelo Climático integrado de Políticas Ambientales (EPIC), para simular impactos en base al crecimiento de planta, desarrollo y rendimiento del cultivo y Zonificación Agroecológica (ZAE) para simular impactos a partir de la aptitud o idoneidad de los sistemas de producción.

Se seleccionó seis cultivos, de los cuales tres tienen información para simular con alto grado de confianza (maíz amarillo duro, arroz y papa), debido a que posee información de experimentos en campo con información relevante para los modelos de simulación. Mientras que para los cultivos de maíz suave seco, fréjol seco y caña de azúcar (uso industrial); no se encontró información que pueda cumplir con los parámetros de eficiencia en el modelo, se consideró la información de partida para medir su grado de certeza para representar la información que se modela.

Las 248 unidades se simularon paralelizadas en servidores de procesamiento de alta capacidad; de donde se obtuvo las salidas de simulación, en cada unidad experimental los datos que se consiguió están a nivel diario y anual.

Se configuró un total de 248 unidades de simulación para ingresar al modelo EPIC; en

cada unidad de simulación se encuentra los datos recopilados de clima, suelo, cultivo y manejo; para los seis cultivos seleccionados. 15 unidades para el cultivo de fréjol; 69 unidades para el cultivo de maíz amarillo duro, 58 unidades para el cultivo de maíz suave seco; 31 unidades para el cultivo de papa; 43 unidades para el cultivo de arroz y 32 unidades para el cultivo de caña de azúcar.

Se realizaron 266 corridas del modelo de simulación EPIC para el período base (1985-2015), 18 corridas preliminares para calibración en total para los cultivos; 266 corridas con el modelo calibrado. Se realizó 1.240 corridas para clima futuro, es decir una corrida para cada año tipo.

Se analizó los datos de simulación por cultivo, las salidas de cada simulación se presentan en archivos “.csv” o “.txt”, que son compatibles con cualquier editor de texto y hoja electrónica para poder leer los datos, en total se obtienen 9063 archivos de los cuales 4.518 archivos se utilizan para caracterizar los rendimientos de los 6 cultivos.

Una vez que se calibró el modelo EPIC para los 6 cultivos priorizados; se obtuvo un NSE superior a 0.6 en todos los casos, determinando que el modelo es aplicable para las condiciones naturales del país. Se realiza la simulación para cada año tipo y para cada cultivo, en este caso se analizó la amenaza de estrés térmico y estrés hídrico; determinando que para los 6 cultivos el estrés térmico es que causa mayor impacto en la reducción del rendimiento.

De la información de clima recopilado, precipitación y temperatura están disponibles para cada unidad de simulación. En el caso de radiación solar, se estimó a partir de la ecuación de Angstrom con la heliofanía observada en las estaciones del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) para el período 1985-2015; obteniendo 248 unidades con radiación solar.

En cuanto a la información recopilada de suelo, la base de datos entregada no posee información para todas las unidades de simulación en al menos el 70% de estas, no se encuentra información de punto de marchitez permanente, capacidad de campo, saturación y variables de química de suelo como contenido de carbón, pH y densidad aparente, necesarias para operar el módulo de balance hídrico.

Respecto a la información de manejo de cultivos, no existe una base de datos que contenga los manejos agronómicos de los cultivos a simular, se construyó esta información con fuentes secundarias y ensayos de investigación puntual para años específicos, se obtiene 6 archivos para manejo de cultivo y 6 archivos para rendimientos de cultivo.

Con esta información gestionada para el modelo EPIC, se proceda a generar las bases de datos correspondientes para cada simulación en formatos compatibles con la interfaz.

Para la ZAE, el insumo inicial de información son los requerimientos agroecológicos de los diferentes cultivos, los rangos de cada parámetro de las variables (suelos, relieve y clima) que obligatoriamente necesita el cultivo.

De la información recopilada sobre los requerimientos agroecológicos se genera una matriz de decisión que asocia las variables de relieve, suelo y clima con los requerimientos agroecológicos en cuatro categorías de aptitud: óptima, moderada, marginal y no apta. La matriz de decisión asocia las variables de relieve, suelo y clima con los requerimientos agroecológicos del cultivo, esto permitirá tener los rangos de aptitud por cada variable según el cultivo para su posterior uso en el modelamiento en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Para la ZAE, los requerimientos agroecológicos del cultivo se generalizan en las unidades geográficas de las variables de suelo y clima; al disponer de información de todo el territorio continental, no se seleccionarán unidades de producción específicas para el modelamiento de los cultivos de arroz y caña de azúcar.

Dentro de la matriz de decisión, la categoría óptima contiene los datos de los requerimientos agroecológicos del cultivo en las mejores condiciones, mientras que, para las categorías moderada, marginal y no apta se determinan con el soporte de una ficha bibliográfica del cultivo.

*Categoría óptima:* se refiere a las mejores condiciones para el desarrollo del cultivo. En este

caso, el productor requerirá una inversión mínima debido a que el lugar de establecimiento del cultivo cumple con las condiciones óptimas para una producción sostenible (MAG, 2012). Para el cultivo de arroz no se identificaron unidades de producción sembradas en esta categoría y para caña de azúcar el 9% promedio de la superficie sembrada se encuentra en condiciones naturales óptimas, considerando los años climáticos histórico y futuros analizados.

*Categoría moderada:* representan un grado de limitación en la disponibilidad biofísica o climática para el desarrollo del cultivo. En este sentido, el productor debe realizar una inversión adicional para alcanzar una buena producción en estas zonas. Esta categoría está ligada al nivel de referencia (general, local y específico) del cultivo (MAG, 2012). El 13% promedio de las unidades de producción de arroz y el 32% promedio de las unidades de producción de caña, se encuentran en esta categoría.

*Categoría marginal:* se caracteriza porque los rangos de los parámetros biofísicos o climáticos representan un grado de limitación mayor para el desarrollo del cultivo respecto a las categorías anteriormente descritas, representando una alta inversión para el productor, para alcanzar una buena rentabilidad en base al costo/beneficio del cultivo (MAG, 2012). El 23% de las unidades de producción promedio del período climático analizado se encuentran en esta categoría. Para caña de azúcar el 33% promedio de las unidades de producción se encuentran en zonas marginales en condiciones naturales.

*Categoría no apta:* en esta categoría se incluirán todos los parámetros no contenidos en las anteriores categorías, definidos como aquellas condiciones que no permitirán el adecuado desarrollo del cultivo o que degraden el recurso suelo y agua en sus condiciones naturales (MAG, 2012). Para arroz, 64% de las unidades de producción del período climático analizado se encuentran en zonas con condiciones naturales no aptas. Para caña de azúcar, el 27% de las unidades de producción del mismo período climático analizado, se encuentran en zonas con condiciones naturales adversas.

b) Impacto biofísico de cultivos – modelamiento con EPIC

Dentro de la descripción del impacto biofísico, EPIC detecta que el estrés térmico es aquel que incide directamente sobre el rendimiento de los cultivos; estrés hídrico y estrés por nutrimento de plantas; arroja valores que no son significativos, en este sentido se detalla los impactos que genera el estrés térmico, que se deriva de la anomalía de temperatura para cada año tipo, en este caso se expresa por el número de días en el cual el cultivo ha sido impactado.

En el caso del maíz amarillo duro, en figura 1 se observa que al analizar el estrés térmico en todos los años tipos, resultó que para la provincia de Los Ríos presenta alto nivel de estrés con magnitudes de 4 a 8 días. Para Manabí se presenta un menor estrés térmico para el cultivo de maíz duro, la provincia de Loja no sufre cambios en el estrés térmico con ningún año tipo; la provincia de Guayas presenta estrés térmico para el año tipo 5.

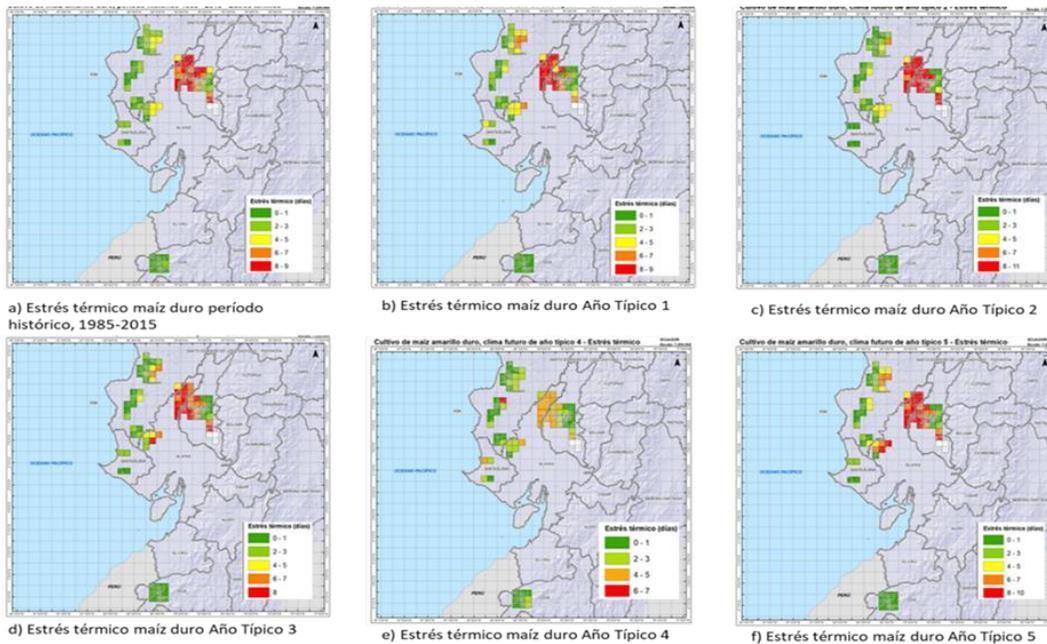


Figura 1. Impacto de cambio climático por año tipo para el estrés térmico en el cultivo de maíz duro.

Para el maíz suave, en la figura 2, se observa que el estrés térmico en varias zonas a lo largo del callejón interandino presenta entre 21 a 119 días con temperaturas anómalas, que pueden provocar la reducción del rendimiento del cultivo. Con el año tipo 4 y 5 se observa que los días con

estrés pueden aumentar hasta 143 días con eventos de temperatura se observa, sobre todo en las provincias de Cotopaxi, Tungurahua y Chimborazo, provocando incluso el cese del crecimiento vegetativo del cultivo.

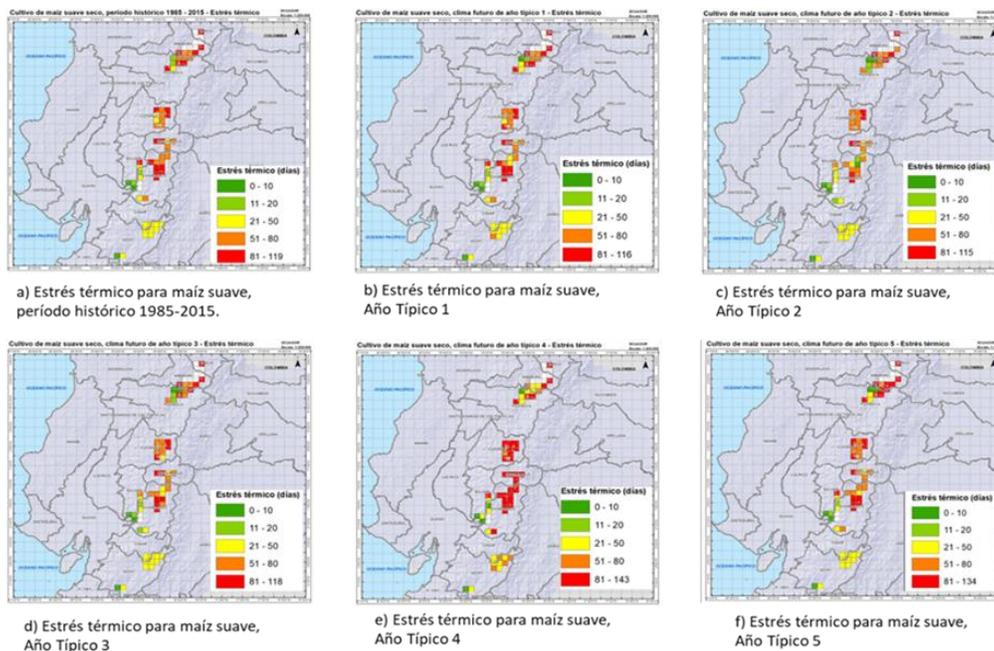


Figura 2. Impacto de cambio climático por año tipo para el estrés térmico en el cultivo de maíz suave.

Para el cultivo de fréjol, en la figura 3 el estrés térmico histórico, para la provincia de Imbabura presenta de 1 a 10 días de estrés térmico, a excepción del sitio 3.730 (cantón Ibarra) donde

los días de estrés son de 16 a 20. En la provincia del Carchi los días de estrés se ven incrementadas en un rango que va desde 11 a 20 días, limitando el crecimiento del cultivo.

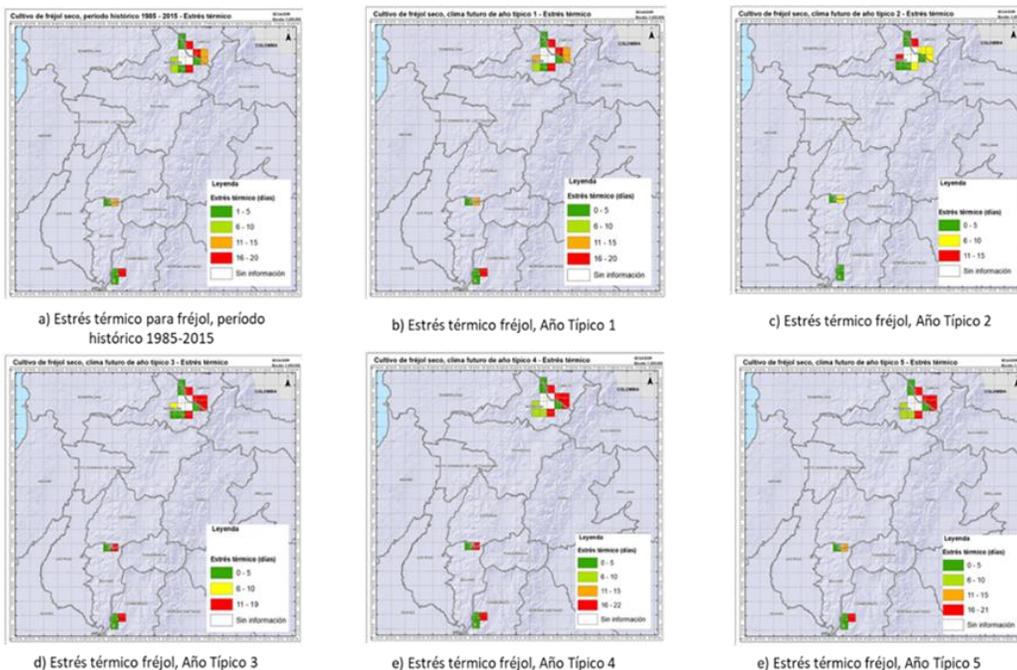


Figura 3. Impacto de cambio climático por año tipo para el estrés térmico en el cultivo de fréjol seco.

Para el cultivo de caña de azúcar, en la figura 4, se muestra el estrés térmico en varias zonas a lo largo del callejón interandino que presentan entre 21 a 119 días con temperaturas extremas

(mínimas o máximas), factores que pudieron afectar el rendimiento del cultivo. Con el año tipo 4 y 5 se observa que los días con estrés pueden aumentar hasta 143 días con eventos de

temperatura extrema, provocando incluso el cese del crecimiento vegetativo del cultivo, este efecto

se observa sobre todo en las provincias de Tungurahua y Chimborazo.

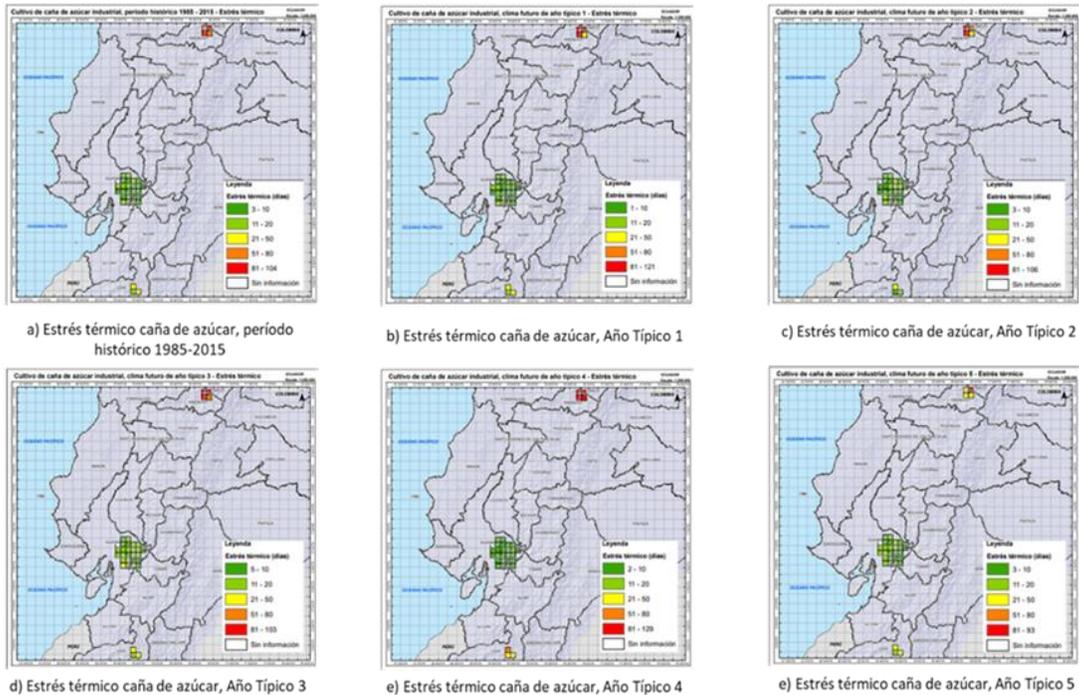


Figura 4. Impacto de cambio climático por año tipo para el estrés térmico en el cultivo de caña de azúcar.

Para el cultivo de arroz, en la figura 5, el estrés térmico para el presente hasta 80 días de pérdida en zonas como Loja, cuenca baja del río Guayas y zona norte de Manabí; para los demás cuadrantes el promedio de días de pérdida es de

2 a 20 días de pérdida, es menester estudiar la fenología del cultivo en estos sitios, para entender la forma de resistencia de la planta a los impactos de los factores agroambientales.

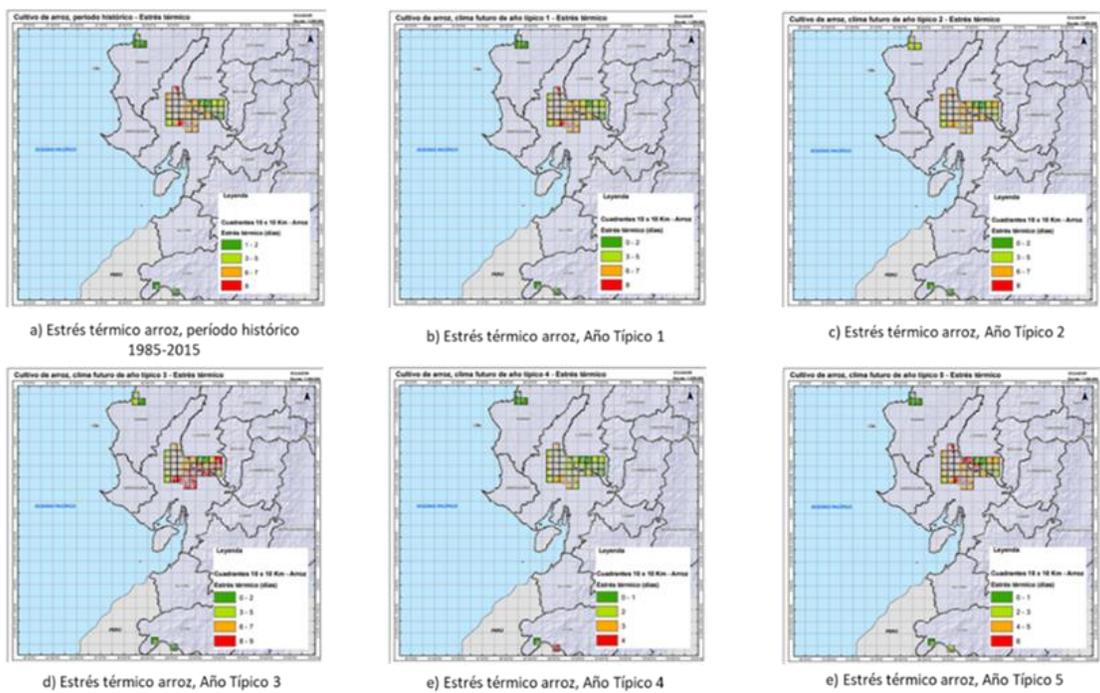


Figura 5. Impacto de cambio climático por año tipo para el estrés térmico en el cultivo de arroz.

c) Impacto sobre el rendimiento de cultivos

Como se observa en la figura 6, la expresión del impacto sobre el rendimiento de los cultivos de los años tipos genera variaciones positivas y

negativas, dependiendo del cultivo, entendiéndose que el elemento sensible para el rendimiento es la temperatura.

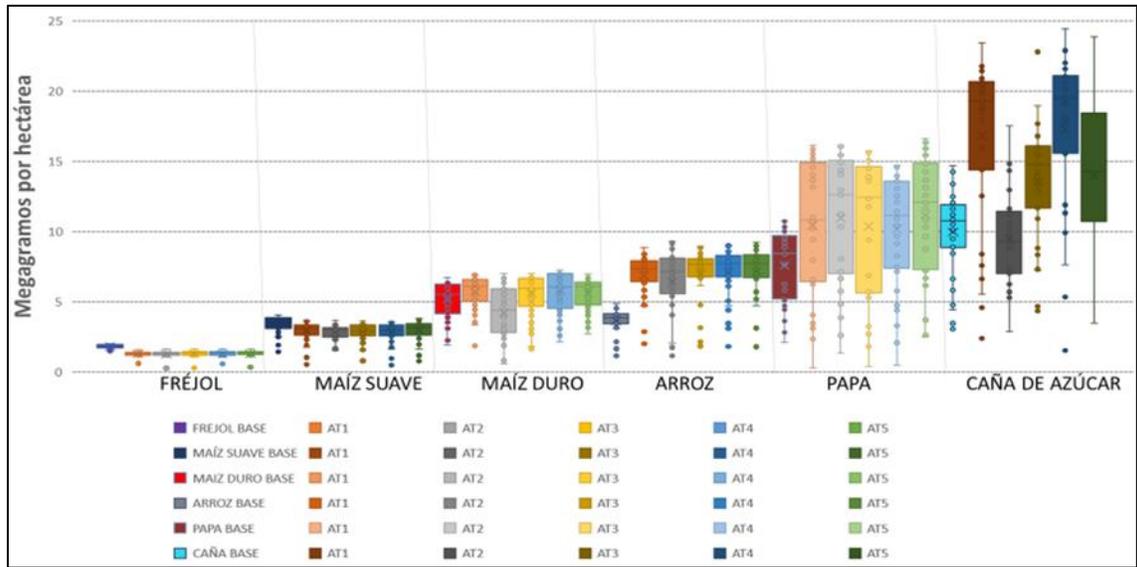


Figura 6. Simulación del rendimiento de cultivos (Mg/ha) con el modelo EPIC para el período base (1985-2015) e impacto del clima futuro con años tipos.

Para el cultivo de fréjol se observa en la figura 6, que el rendimiento para todos los años tipos es negativo, lo que nos indica que el cultivo es altamente sensible a variaciones de la temperatura ambiente y genera un alto estrés térmico sobre el crecimiento del cultivo de fréjol.

Para el cultivo de maíz suave, se observa un comportamiento de impacto negativo sobre el rendimiento del cultivo para los años tipos, se entiende en este sentido que el estrés térmico

guía el crecimiento y la baja de la producción del cultivo.

Para el maíz amarillo duro, se observa en la figura 6 que la tendencia de crecimiento se mantiene en los límites del boxplot presentado, indicando que este cultivo está adaptado a las variaciones climatológicas que puedan generarse; el año tipo 2 es el que mayor variación negativa presenta y el año tipo 1 es el que presenta mayor variación sobre la media histórica.

Para el cultivo de arroz, se observa de la figura 6 que la climatología para todos los años tipos es ideal para el desarrollo del cultivo, presentando impactos positivos sobre el rendimiento, esta mejor respuesta se explica fisiológicamente por la optimización en el uso de la radiación; que genera el estrés térmico para el control del crecimiento del cultivo.

Para el cultivo de papa, se observa que existe un rango de variación amplio, para impactos negativos y positivos, presentando una media para todos los años tipos superior a la media

d) Impactos biofísicos sobre rendimientos y sus áreas de producción

El impacto biofísico para el maíz amarillo duro expresa la diversidad de impactos por cada año tipo en la probabilidad de ocurrencia de los patrones climatológicos futuros, basados en la climatología observada. El rendimiento promedio de maíz amarillo duro a nivel nacional es de 5.5 Mg/ha. El año tipo 2 es el que produce pérdidas de los cultivos; de la figura 7; el año tipo 2, presenta una variación de 0.55 a 6.98 Mg/ha y un promedio de 4.2 Mg/ha, disminución de rendimiento causado por el estrés térmico. El año tipo 3 presenta mejores condiciones para la producción del cultivo en especial en la cuenca del río Guayas.

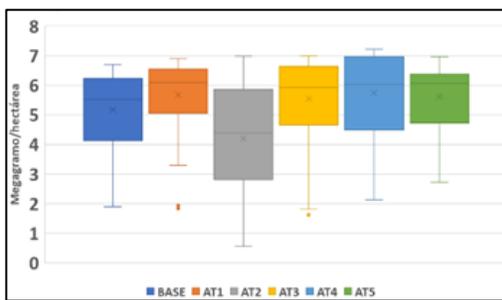


Figura 7. Impacto del cambio climático sobre el rendimiento de maíz amarillo duro.

histórica; sin embargo, para la variación de rendimiento por el estrés térmico se observa que el año 1 presenta la menor variación de rendimiento y el año tipo 3 la mayor variación de rendimiento, en todo caso mejora el rendimiento para el cultivo de papa con el escenario de cambio climático.

Para el cultivo de caña de azúcar, se observa de la figura 6 que existe un impacto del estrés térmico para cada año tipo, en el caso del año tipo 1 el promedio de rendimiento es superior a la media histórica llegando aproximadamente a 20 megagramos por hectárea; el año tipo 2 presenta un impacto negativo sobre el rendimiento con el estrés térmico llegando a 8 megagramos por hectárea, para el año tipo 3 se observa un comportamiento superior a la media del rendimiento histórico pero más bajo que el año tipo 1; el año tipo 3 tiene un comportamiento similar al año tipo 1 y el año tipo 5 es el que mayor rango de variación de impactos presenta, la media sigue siendo superior a la del rendimiento base, aproximadamente 15 megagramos por hectárea.

Para el maíz suave, como se evidencia en la figura 8; la distribución de los impactos para todos los años es homogénea; el promedio de rendimiento de maíz suave es de 3.4 Mg/ha; el promedio de impactos de pérdidas está entre 2.5 y 3 Mg/ha. La zona norte del callejón interandino presenta mejores condiciones de adaptabilidad para el cultivo, las zonas centro y sur presentan condiciones que van a variar y empeorar las condiciones para el rendimiento óptimo del cultivo.

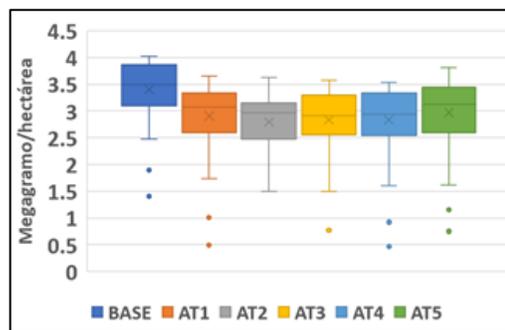


Figura 8. Impacto del cambio climático sobre el rendimiento de maíz suave.

Para el cultivo de fréjol, se observa en la figura 9, que los límites del boxplot de línea base, están alineados a los límites superiores de los rendimientos de los años tipos, es decir aún no se han observado las pérdidas que puede

potencialmente provocar los efectos del cambio climático. Especialmente, las zonas de mayor impacto son las provincias de Imbabura y Chimborazo. Se puede observar que el rendimiento del cultivo de fréjol para todos los años tipos disminuye en todas las unidades de cobertura del estudio, resultando en valores negativos, esto debido a períodos de estrés térmico, lo que conlleva a que la planta gaste energía para mantener un equilibrio térmico interno, y finalmente el rendimiento del cultivo se vea afectado.

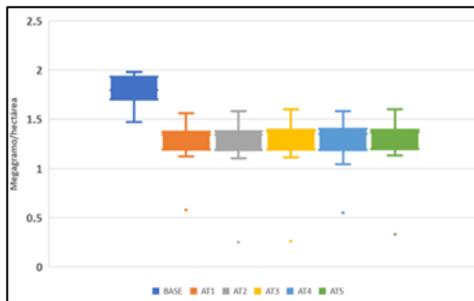


Figura 9. Impacto del cambio climático sobre el rendimiento de fréjol.

Para el cultivo de caña de azúcar, los impactos del cambio climático provocan un mejor desempeño del cultivo. Existen más sitios con impactos positivos que mejoran el rendimiento del cultivo. El año tipo 1 presenta un promedio de 16.8 Mg/ha y una variación de 2.38 a 23.42 Mg/ha. Pocos sitios reducen el rendimiento del cultivo, en especial en la provincia de Imbabura. El año tipo 2 es el que más impactos negativos generan, llegando a 2.83 Mg/ha de rendimiento.

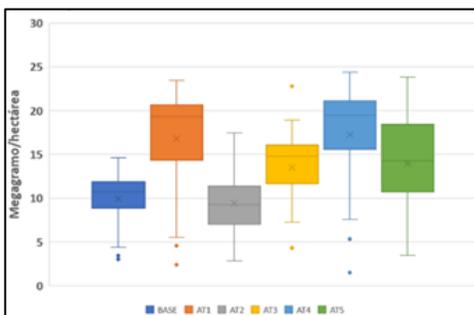


Figura 10. Impacto del cambio climático sobre el rendimiento de caña de azúcar.

De la figura 11, se observa que, para el cultivo de arroz, los impactos de los años tipos en su mayoría son positivos. En zonas como Manabí, Guayas y Loja se evidencia un impacto negativo para el año tipo 2. El promedio histórico de rendimiento es de 3.63 Mg/ha; todos los años tipos sobrepasan el rendimiento base, hasta el doble de rendimiento en el año tipo 5 con 7.15 Mg/ha.

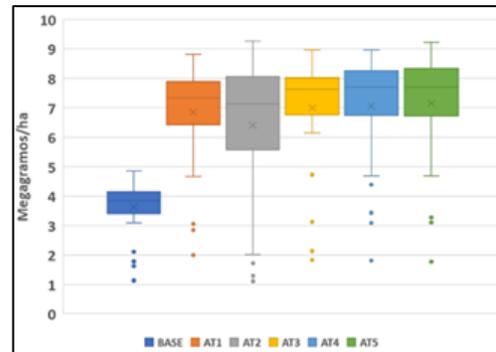


Figura 11. Impacto del cambio climático sobre el rendimiento de arroz.

Para el cultivo de papa, no existen impactos negativos en los años tipo y en la mayor parte del país, a excepción de Carchi y Chimborazo que presentan pérdidas por estrés térmico.

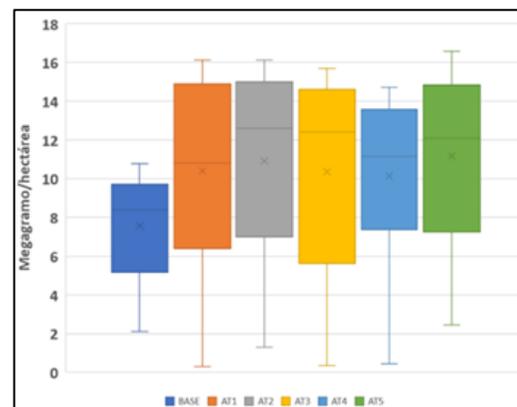


Figura 12. Impacto del cambio climático sobre el rendimiento de papa.

- e) Impacto biofísico sobre la aptitud para la producción de cultivos – modelamiento con ZAE

El análisis de los impactos biofísicos, traducidos en la injerencia de la variación de las condiciones climáticas para condicionar los diferentes niveles de aptitud del suelo para la producción de un cultivo, se lo realiza comparando los resultados obtenidos en la ZAE para el período histórico 1985-2015 con cada uno de los años tipo de clima futuro, respecto a la superficie en hectáreas para cada una de las categorías de aptitud.

El año tipo 1, es el que presenta el mayor nivel de impacto en cuanto a la pérdida de superficie con niveles de aptitud para la producción de arroz, considerando la inversión necesaria para aplacar las limitaciones en condiciones naturales, respecto al resto de años tipo de clima futuro. Se identifica una disminución de 520.000 hectáreas (ha) que pasan de categorías de ZAE moderada y marginal en el período histórico a áreas no aptas para la producción de arroz.

Categorías	ZAE 1er año típico futuro			
	Aumento		Disminución	
	Ha	% <sup>1</sup>	ha	%
<b>Moderado</b>	-	-	-260.000	-41%
<b>Marginal</b>	-	-	-260.000	-22%
<b>No apto</b>	520.000	2%	-	-

Tabla 1. Matriz de aumento y disminución de áreas de aptitud del cultivo de arroz, año tipo 1.

El escenario de impacto para el año tipo 2, es positivo para un total de 60.000 ha que en el período histórico presentan condiciones no aptas para la producción de arroz, estas pasan a condiciones marginales. Sin embargo, se pierden 200.000 ha con aptitudes moderadas en el histórico a condiciones marginales en el año tipo 2.

Categorías	ZAE 2do año típico futuro			
	Aumento		Disminución	
	Ha	%	ha	%
<b>Moderado</b>	-	-	-200.000	-32%
<b>Marginal</b>	260.000	22%	-	-
<b>No apto</b>	-	-	-60.000	-0,30%

Tabla 2. Matriz de aumento y disminución de áreas de aptitud del cultivo de arroz, año tipo 2.

<sup>1</sup> Porcentaje respecto a la superficie total de cada categoría de ZAE en cada año tipo de clima futuro.

Para el año tipo 3, el impacto se centra en la pérdida de 170.000 ha que en el período histórico presentan condiciones marginales para la producción de arroz, las cuales pasan a condiciones no aptas.

Categorías	ZAE 3er año típico futuro			
	Aumento		Disminución	
	ha	%	ha	%
<b>Moderado</b>	0	0%	0	0%
<b>Marginal</b>	-	-	-170.000	-14%
<b>No apto</b>	170.000	0,80%	-	-

Tabla 3. Matriz de aumento y disminución de áreas de aptitud del cultivo de arroz, año tipo 3.

El año tipo 4, presenta un nivel de impacto importante en cuanto a la pérdida de superficie con condiciones de aptitud moderada (100.000 ha) y marginal (150.000 ha) presentes en el período histórico, que pasan a condiciones no aptas para la producción de arroz.

Categorías	ZAE 4to año típico futuro			
	Aumento		Disminución	
	ha	%	Ha	%
<b>Moderado</b>	-	-	-100.000	-16%
<b>Marginal</b>	-	-	-150.000	-13%
<b>No apto</b>	250.000	1%	-	-

Tabla 4. Matriz de aumento y disminución de áreas de aptitud del cultivo de arroz, año tipo 4.

En el año tipo 5, el nivel de impacto es positivo, debido a que 190.000 ha que el período histórico presenta condiciones no aptas para la producción de arroz, pasan a condiciones marginales.

Categorías	ZAE 5to año típico futuro			
	Aumento		Disminución	
	ha	%	Ha	%
<b>Moderado</b>	0	0%	0	0%
<b>Marginal</b>	190.000	16%	-	-
<b>No apto</b>	-	-	-190.000	-1%

Tabla 5. Matriz de aumento y disminución de áreas de aptitud del cultivo de arroz, año tipo 5.

Respecto a la distribución territorial de las categorías de ZAE para cada año tipo relacionado al período histórico, se evidencia que en el año tipo 1 disminuyen las áreas de categoría moderada de una manera significativa en las provincias de Los Ríos y Guayas; aumentando principalmente en la cuenca baja del río Guayas las áreas con categoría de ZAE marginal, al norte de Los Ríos en cambio, se identifica una pérdida importante de áreas marginales que se convierten en no aptas.

Para el año tipo 2, se proliferan las áreas dispersas de categoría marginal, identificando pequeñas áreas en las provincias de la Amazonía como en Napo y Morona Santiago y una zona consolidada en el sur de la provincia de Esmeraldas. Es importante mencionar la pérdida de superficie que en el período histórico son áreas con aptitud moderada para la producción de arroz en las provincias de Manabí y El Oro, que para el año tipo 2 pasan a condiciones de aptitud marginales.

La distribución territorial de las áreas con categorías de ZAE para el año tipo 3 son muy

similares a las áreas identificadas en el período histórico, a excepción de un área consolidada en el extremo oriental de la provincia de Orellana con aptitud marginal para la producción de arroz.

Para el año tipo 4, el principal cambio respecto al período histórico en cuanto a la distribución territorial de las áreas con diferentes categorías de aptitud, se identifica en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, en la cual pasan de categoría marginal en el histórico a categoría no apta.

Para el año tipo 5, el escenario de distribución territorial de las áreas con categorías de aptitud es una conjugación a lo identificado en los años tipo 2 y 3; con un incremento importante de áreas con categoría marginal en las estribaciones de la cordillera occidental y en las provincias amazónicas de Napo, Morona Santiago y Orellana. Siempre la cuenca del río Guayas es la zona donde se concentran las áreas con condiciones moderadas para la producción de arroz.

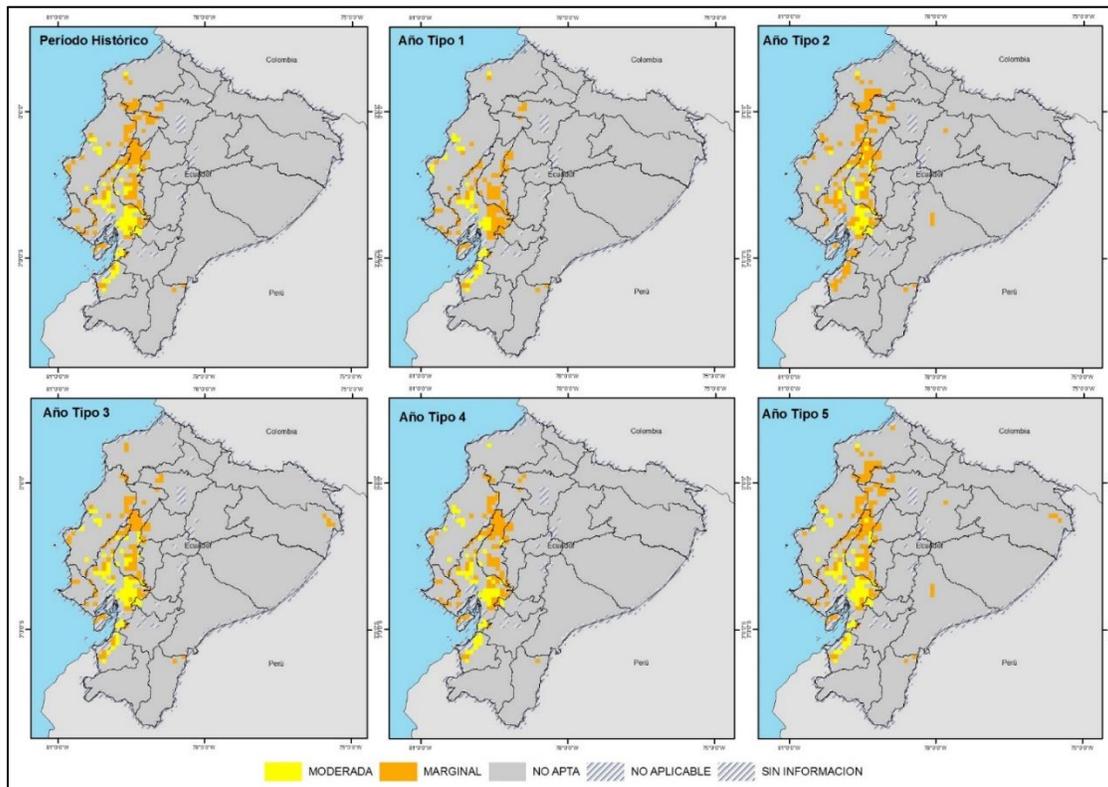


Figura 13. Mapas de zonificación agroecológica de arroz, bajo escenarios climáticos del presente (1985-2015) y futuro (2020 – 2050) para los 5 años tipo.

En cuanto a los resultados obtenidos de la modelación con ZAE para el cultivo de caña de azúcar (uso industrial), respecto a los impactos biofísicos, podemos identificar que el año tipo 1 de clima futuro es aquel que presenta mayores cambios en comparación al período histórico, en cuanto a la pérdida de superficie con aptitudes óptimas (60.000 ha), moderadas (860.000 ha) y marginales (3.500.000 ha), que pasan a condiciones de aptitud no apta para la producción de caña de azúcar.

Categorías ZAE	ZAE 1er año típico futuro			
	Aumento		Disminución	
	ha	%	Ha	%
<b>Óptima</b>	-	-	-60.000	-75%
<b>Moderada</b>	-	-	-860.000	-59%
<b>Marginal</b>	-	-	-3.530.000	-59%
<b>No apta</b>	4.450.000	28%	-	-

Tabla 6. Matriz de aumento y disminución de áreas de aptitud del cultivo de caña de azúcar, año tipo 1.

En el año tipo 2, el impacto es positivo para un total de 950.000 ha, que en el período histórico presentan condiciones no aptas para la producción de caña de azúcar, las cuales pasan a condiciones moderadas (110.000 ha) y a condiciones marginales (840.000 ha). Sin embargo, existe un impacto negativo de 60.000 ha que en el período histórico presentan condiciones óptimas, las cuales pasan a condiciones moderadas.

Categorías ZAE	ZAE 2do año típico futuro			
	Aumento		Disminución	
	Ha	%	Ha	%
<b>Óptima</b>	-	-	-60.000	-75%
<b>Moderada</b>	170.000	12%	-	-
<b>Marginal</b>	840.000	14%	-	-
<b>No apta</b>	-	-	-950.000	-6%

Tabla 7. Matriz de aumento y disminución de áreas de aptitud del cultivo de caña de azúcar, año tipo 2.

Para el año tipo 3, las áreas con condiciones óptimas (80.000 ha) para la producción de caña de azúcar identificadas en el período histórico no cambian. Sin embargo, se identifica un impacto negativo en las áreas que se identificaban con condiciones moderadas (220.000 ha) y marginales (400.000 ha), que pasan a condiciones no aptas.

Categorías ZAE	ZAE 3er año típico futuro			
	Aumento		Disminución	
	ha	%	ha	%
<b>Óptima</b>	0	0%	0	0%
<b>Moderada</b>	-	-	-220.000	-15%
<b>Marginal</b>	-	-	-400.000	-7%
<b>No apta</b>	620.000	4%	-	-

Tabla 8. Matriz de aumento y disminución de áreas de aptitud del cultivo de caña de azúcar, año tipo 3.

En el año tipo 4, se evidencia un importante impacto negativo respecto a las áreas con niveles de aptitud para la producción de caña de azúcar identificadas en el período histórico, un total de 1.850.000 ha pasan a condiciones no aptas, repartidas en áreas que tuvieron aptitud óptima (30.000 ha), moderada (180.000 ha) y marginal (1.640.000 ha).

Categorías ZAE	ZAE 4to año típico futuro			
	Aumento		Disminución	
	ha	%	ha	%
<b>Óptima</b>	-	-	-30.000	-38%
<b>Moderada</b>	-	-	-180.000	-12%
<b>Marginal</b>	-	-	-1.640.000	-28%
<b>No apta</b>	1.850.000	12%	-	-

Tabla 9. Matriz de aumento y disminución de áreas de aptitud del cultivo de caña de azúcar, año tipo 4.

El impacto para el año tipo 5 es positivo, identificando un total de 660.000 ha que en el período histórico fueron no aptas para la producción de caña de azúcar, las cuales pasan a condiciones moderadas (240.000 ha) y marginales (420.000 ha). Cabe mencionar que para el año tipo 5 las áreas con condiciones óptimas no cambian respecto al período histórico (80.000 ha).

Categorías ZAE	ZAE 5to año típico futuro			
	Aumento		Disminución	
	Ha	%	ha	%
<b>Óptima</b>	0	0%	0	0%
<b>Moderada</b>	240.000	16%	-	-
<b>Marginal</b>	420.000	7%	-	-
<b>No apta</b>	-	-	-660.000	-4%

Tabla 10. Matriz de aumento y disminución de áreas de aptitud del cultivo de caña de azúcar, año tipo 5.

Respecto a la distribución territorial de las categorías de ZAE para cada año tipo relacionado al período histórico, se evidencia que en el año tipo 1 disminuyen las áreas de categoría óptima, moderada y marginal de una manera significativa en la provincia de Los Ríos, pasando a ser áreas con condiciones no aptas. En las provincias de Guayas y Manabí también se evidencia una reducción importante de las áreas con aptitudes moderadas pasando a áreas no aptas para la producción de caña de azúcar.

Para el año tipo 2, el mayor cambio en cuanto a la distribución territorial de las áreas con categorías de ZAE respecto al período histórico, se evidencia en el aumento importante de las áreas con condiciones marginales para la producción de caña de azúcar, especialmente en la región Sierra. Es importante mencionar, el aumento de áreas con categoría moderada en las provincias de Manabí y Los Ríos.

La distribución territorial de las áreas con categorías de ZAE para el año tipo 3 son muy similares a las áreas identificadas en el período histórico, a excepción de un área consolidada en el extremo occidental de la provincia de Esmeraldas donde se evidencia la pérdida de áreas con categoría marginal, que pasan a áreas no aptas.

Para el año tipo 4, la distribución de las áreas con categoría marginal es más dispersa en comparación al período histórico, principalmente en la región Sierra. En la provincia de Los Ríos, se identifica un impacto negativo en cuanto a la transición de áreas con categoría marginal en el histórico a áreas con categoría no apta.

Para el año tipo 5, el escenario de distribución territorial de las áreas con categorías de aptitud es muy similar a la identificada en el año tipo 2, con un incremento importante en áreas consolidadas con categoría marginal, especialmente en la región Sierra.

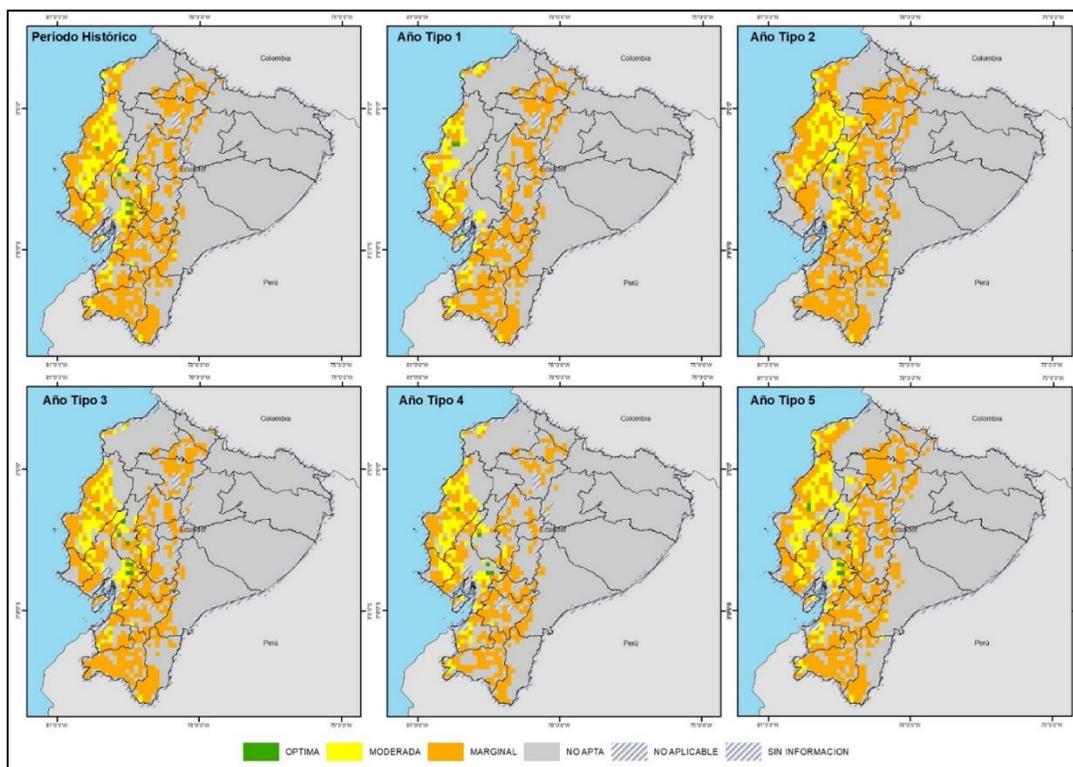


Figura 14. Mapas de zonificación agroecológica de caña de azúcar, bajo escenarios climáticos del presente (1985-2015) y futuro (2020 – 2050) para los 5 años tipo.

## 5. Discusión y conclusiones

### a) Modelo EPIC

La información necesaria para simular en el modelo de cultivo no es la suficiente a nivel de país, se debe generar planes, proyectos o programas que permitan realizar periódicamente el levantamiento de información, al menos, fenología de cultivos, datos meteorológicos y de suelos.

En casos como INIAP, existe información no catalogada de cultivos, se debe generar un proceso de rescate de datos para obtener información histórica de desarrollo de variedades y sus descriptores.

Para la simulación de modelos de cultivos, es necesario tener una capacidad tecnológica y técnica actualizada, al menos un procesador i7 y 16 Gb de RAM, en paralelo.

Para el año tipo 1 y 2 se puede evidenciar que los principales cambios se dan en una reducción potencial de la biomasa; siendo un gran impacto para el crecimiento de las plantas que no se adaptan a ser cultivadas en este año tipo.

Para el año tipo 3, se evidencia cambios positivos en especial en la provincia de Manabí para los cultivos de maíz duro y arroz, siendo los cultivos adaptables a las condiciones climatológicas para expresar el potencial genético del crecimiento y desarrollo bajo estas condiciones. En el caso de la provincia de Los Ríos el impacto es negativo para los cultivos de arroz y maíz duro. Loja, Guayas y las provincias de la sierra no presentan cambios en la biomasa o no son perceptibles.

Para el año tipo 4, se evidencia un impacto positivo en los cultivos de maíz duro y arroz, para la provincia de Los Ríos bajo las condiciones climatológicas presentadas. También se observan impactos positivos en las provincias de Loja, Guayas y Manabí en menor escala, la caña de azúcar se evidencia con mayor producción de biomasa para todas las localidades. El cultivo de fréjol evidencia una reducción de hasta el 50% de su rendimiento.

Para el año tipo 5, se observa que la provincia de Los Ríos es impactada negativamente por la climatología que se presenta, reduciendo su potencial producción de los cultivos de arroz y maíz duro. En la sierra se observan impactos

negativos en el cultivo de maíz suave, para el fréjol se observa un impacto negativo de hasta el 50% de reducción del rendimiento.

En general el impacto del cambio climático con los escenarios de año tipo, presenta un impacto negativo, reduciendo el rendimiento de los 6 cultivos.

### b) Modelo ZAE

Para el año 1, se puede evidenciar que el 68% de las unidades de producción de arroz se encuentran en zonas potencialmente no aptas para la producción del cultivo; para las áreas de producción consolidadas de caña de azúcar el porcentaje en zonas no aptas es aún mayor con el 88%.

Para el año 2, se evidencian cambios positivos en cuanto al porcentaje de unidades de producción de caña en zonas no aptas, se reduce a tan sólo el 7% y se incrementa el porcentaje en zonas con categoría de ZAE moderada al 48%. En el caso de arroz la situación es ligeramente positiva debido a que se reducen las áreas de producción en zonas no aptas en un 5% respecto al año tipo 1.

Para el año 3, las unidades de producción de caña de azúcar experimentan mejoras en cuanto a la reducción del porcentaje en zonas no aptas (5%) y el aumento en zonas óptimas y moderadas con el 13% y 37% respectivamente. Para las unidades de producción de arroz se mantienen los porcentajes de unidades de producción en zonas no aptas, pero incrementan el 5% de superficie sembrada en zonas moderadas respecto al año tipo 2.

Para el año 4, se evidencia un mayor impacto en cuanto a la cobertura de unidades de producción en zonas no aptas para la producción de los cultivos, incrementando el porcentaje a un 44% en caña de azúcar y a un 66% en arroz. El porcentaje de unidades de producción en zonas de ZAE óptimas para caña de azúcar se mantiene en 12% y para arroz en zonas moderadas con el 14%.

Para el año 5, mejoran las condiciones para las unidades de producción de caña de azúcar, reduciendo el porcentaje en zonas no aptas al 10% y aumentando a un 13% en zonas óptimas y 37% en zonas moderadas para la producción del cultivo. El caso de arroz mantiene la misma tendencia de ocupación de sus unidades de

producción en categorías ZAE respecto a los años tipo analizados anteriormente.

c) Medidas de adaptación

Con el objetivo de reducir los impactos biofísicos que afectan a la variación de las tasas de producción biomasa y rendimiento y a los niveles de aptitud agrícola para la producción de cultivos, se plantean posibles medidas de adaptación a ser consideradas:

1. Implementar políticas y acciones orientadas para mejorar la cobertura de riego:
  - a. Ampliar la cobertura de los sistemas de riego parcelario tecnificado (*política nacional*).
  - b. Aprovechar las fuentes hídricas subterráneas y superficiales (*política local*).
  - c. Impulsar la cosecha de agua lluvia (*práctica a nivel de productor*).
2. Monitoreo de capacidad de campo del suelo, mediante el desarrollo de innovación y tecnología; para la optimización en el aprovechamiento del recurso hídrico para riego (*política local/práctica a nivel productor*).
3. Mejorar la estructura de financiamiento productivo para el desarrollo de actividades agropecuarias:
  - a. Ampliar la cobertura de seguro agrícola (*política nacional*).
  - b. Incrementar el acceso formal a créditos productivos (*política nacional*).
4. Uso adecuado de fertilizantes a partir de análisis de suelo que determinen los niveles de materia orgánica, conductividad eléctrica, macro y micro nutrientes (*política local - GADs, casas comerciales, academia*).
5. Uso de abonos orgánicos, en sistemas productivos combinados y empresariales como complemento al proceso de fertilización y en sistemas productivos de autoconsumo (Agricultura Familiar Campesina) como principal práctica de fertilización, mediante la realización de: compost, vióles, lombricultura, bokashi,

entre otros (*política local - GADs y academia*).

6. Implementación de prácticas para la rotación de cultivos de manera secuencial, que permita mejorar la salud del suelo, optimice los nutrientes del suelo y combata la presión de las plagas y malezas en el cultivo (*práctica a nivel de productor y acompañamiento técnico*).
7. Implementación de programas que impulsen el desarrollo de bancos de semillas resistentes a la variabilidad climática, considerando las condiciones biofísicas locales, priorizando la siembra de cultivos nativos e incluyendo saberes ancestrales (*política nacional y local - INIAP y academia*).

## 6. Bibliografía

- Angulo, C., Gaiser, T., Rötter, R. P., Børgesen, C. D., Hlavinka, P., Trnka, M., & Ewert, F. (2014). "Fingerprints" of four crop models as affected by soil input data aggregation. *European Journal of Agronomy*, 61, 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.07.005>
- Arunrat, N., Pumijumnong, N., & Hatano, R. (2018). Predicting local-scale impact of climate change on rice yield and soil organic carbon sequestration: A case study in Roi Et Province, Northeast Thailand. *Agricultural Systems*, 164, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.04.001>
- Caiza, J. (2015). *Determinación del balance hídrico en el cultivo de maíz duro (Zea mays)*. Balzar-Guayas. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/2500/0/6733>
- Candelaria Martínez, B., Rosado, O. R., Gallardo López, F., Pérez Hernández, P., Becerra, M., & Vargas Villamil, L. (2011). APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN EN EL ESTUDIO Y PLANIFICACIÓN DE LA AGRICULTURA, UNA REVISIÓN. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 999–1010. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-04622011000300004](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000300004)
- Caviedes Cepeda, G. M. (2019). Producción de semilla de maíz en el Ecuador: retos y oportunidades. *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, 11(1). <https://doi.org/10.18272/aci.v11i1.1100>

- CINCAE. (2022). Construcción de la matriz de decisión de requerimientos agroecológicos para la aplicación del modelo de Zonificación Agroecológica del Cultivo de Caña
- FAO. (1997). *Zonificación agro-ecológica. Guía general. Boletín de suelos de la FAO - 73*. Obtenido de <https://www.fao.org/3/w2962s/w2962s00.htm>
- Izaurrealde, R. C. (2007). Long-term modeling of soil C erosion and sequestration at the small watershed scale. *Climatic change*, 73-90. doi:10.1007/s10584-006-9167-6
- Liu, M., He, B., Lü, A., Zhou, L., & Wu, J. (2014). Parameters sensitivity analysis for a regional applied crop model Parameters sensitivity analysis for a crop growth model applied to winter wheat in the Huanghuaihai Plain in China Parameters sensitivity analysis for a regional applied crop model. *Geosci. Model Dev. Discuss*, 7, 3867–3888. <https://doi.org/10.5194/gmdd-7-3867-2014>
- MAG. (2012). *Zonificación agroecológica del cultivo de banano (Musa sapientum) en el Ecuador a escala 1:25:000 y 1:250.000*. Recuperado el 03 de junio de 2022, de <https://online.fliphtml5.com/wtae/zdnr/#p=1>
- MAG. (2019). *Metodología unificada del estudio geopedológico del Ecuador Continental, escala 1:25:000*. Obtenido de [http://geoport.al.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=0a26e971-5722-4a10-8a5e-d04298b0f017&fname=dm\\_unidad\\_geopedologica\\_25k\\_2019.pdf&access=public](http://geoport.al.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=0a26e971-5722-4a10-8a5e-d04298b0f017&fname=dm_unidad_geopedologica_25k_2019.pdf&access=public)
- MAG. (2020). *Zonificación agroecológica del cultivo de arroz en época de lluvia en condiciones naturales en el Ecuador Continental*. Obtenido de [http://geoport.al.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=eac227ee-94fd-4268-ab05-d6ccec474234&fname=mt\\_zae\\_arroz\\_epoca\\_lluvia\\_2020.pdf&access=public](http://geoport.al.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=eac227ee-94fd-4268-ab05-d6ccec474234&fname=mt_zae_arroz_epoca_lluvia_2020.pdf&access=public)
- PNUD, & MAATE. (2021). *Generación de Insumos Técnicos Clave para la Realización de Análisis de Riesgo Climático en el Sector Soberanía Alimentaria, Agricultura y Ganadería (SAG)*. Informe final de la consultoría, Quito.
- Velasco, I., & Pimentel, E. (2009). *Zonificación agroclimática de papadakis aplicada al estado de Sinaloa*. Obtenido de <http://www.journals.unam.mx/index.php/rig/article/view/23864/41898>
- Wang, X., Williams, J. R., Gassman, P. W., Baffaut, C., Izaurrealde, R. C., Jeong, J., & Kiniry, J. R. (n.d.). EPIC AND APEX: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1447–1462.
- Xiong, W., Skalský, R., Porter, C. H., Balkovič, J., Jones, J. W., & Yang, D. (2016). Calibration-induced uncertainty of the EPIC model to estimate climate change impact on global maize yield. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8(3), 1358–1375. <https://doi.org/10.1002/2016MS000625>