

ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO A TRAVÉS DE LA ELECCIÓN DE CULTIVOS EN PERÚ*

*Luis Miguel Galindo, José Eduardo Alatorre Bremont
y Orlando Reyes Martínez***

RESUMEN

El principal objetivo de este artículo es captar la influencia del cambio climático en la selección endógena de cultivos de los agricultores y los impactos sobre su ingreso esperado. El modelo se aplica a 110 227 productores en Perú. Los resultados muestran que la elección de cultivos se ve afectada por el clima. Se estima una caída de entre 8 y 13% de los ingresos esperados por hectárea. El cambio climático provocará una reducción de los ingresos condicionales para la alfalfa, el arroz, el café y el maíz amarillo duro y aumentos para la papa, el maíz amiláceo, el plátano y la uva; se presentan resultados mixtos para la yuca, dependiendo del modelo climático. El arroz y el café muestran las mayores pérdidas, mientras que la papa nativa obtiene la mayor ganancia. Se muestra que la probabilidad de elegir la cosecha de maíz y de plátano aumenta con los incrementos de temperatura y precipitación.

ABSTRACT

The main objective of this paper is to capture climate change impact on endogenous crop choices by Peruvian farmer's and the impacts on their expected income. The model is estimated across 110 227 farmers in Peru. The results show that both tem-

* *Palabras clave:* cambio climático, agricultura, adaptación. *Clasificación JEL:* Q12, Q51, Q54. Artículo aceptado el 23 de febrero de 2015. Los autores agradecen los comentarios de Fernando Filgueira y Gabriel Porcile. Se aplica el descargo usual de los errores. Las opiniones vertidas en el artículo no representan la posición de estas instituciones.

** Funcionarios de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). El primer autor es también profesor afiliado a la División de Economía del CIDE y profesor de la Facultad de Economía de la UNAM (correos electrónicos: luismiguel.galindo@cepal.org, joseeduardoalatorre@cepal.org y orlando.reyes@cepal.org).

perature and precipitation affect the selection crops. The study estimates that climate change would reduce the expected revenue per hectare in the range of 8% and 13% depending on the climate scenario. Climate change induces a reduction of conditional income for alfalfa, rice, coffee and maize (durum) and increases for potato, starchy maize, bananas and grapes for both climate models, with results mixed for cassava depending on the climate model. Rice and coffee are the crops with the greatest losses, while the native potato is the crop with the highest gain. Also, the probability of choice of maize and banana increases as temperature and precipitation increases.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es inequívoco y tiene consecuencias significativas sobre las actividades económicas, el bienestar de la población y los ecosistemas (IPCC, 2014). La evidencia disponible muestra además que la trayectoria actual de emisiones de gases de efecto invernadero es consistente con un aumento de por lo menos 2°C respecto de su valor medio previo a la Revolución industrial (Stern, 2008; IPCC, 2013). En este contexto, destaca que el sector agropecuario en los países de América Latina y el Caribe es especialmente sensible a las condiciones climáticas y por tanto a los efectos potenciales del cambio climático (CEPAL, 2014). Ello tiene una especial relevancia en Perú, atendiendo a la importancia de este sector agropecuario en la estructura y el dinamismo económico general, a su participación en la generación de empleo y en las exportaciones regionales, a su papel en la generación de ingresos de la población rural y en la oferta regional de alimentos e incluso en su incidencia en las condiciones sociales (Galindo *et al.*, 2014). Por ejemplo, el sector agropecuario en Perú representa alrededor de 8% del PIB y emplea alrededor de 26% de la población económicamente activa, siendo el segundo sector de mayor absorción de mano de obra después del sector servicios (BID y CEPAL, 2014). Estas características indican que el cambio climático tendrá importantes impactos nocivos en el sector agropecuario y en el conjunto de la economía peruana. Por ello, resulta fundamental identificar y fomentar medidas de adaptación al cambio climático en el sector agropecuario que permitan amortiguar estos impactos negativos.

Los procesos de adaptación al cambio climático se definen como acciones o decisiones en respuesta al cambio de clima para reducir costos o incrementar ganancias económicas (IPCC, 2014, 2007). En este sentido, la evidencia disponible muestra que ya existen importantes procesos de adap-

tación al cambio climático de muy diversa índole con consecuencias muy heterogéneas sobre las actividades económicas, el bienestar de la población y los ecosistemas (IPCC, 2014, 2007). Por tanto, identificar estos procesos de adaptación resulta fundamental, aunque muy complejo. En este sentido, este artículo desarrolla un modelo estructural ricardiano (MSR) para identificar las elecciones endógenas de cultivos, derivadas de cambios en el clima, que realizan los productores agropecuarios y los impactos derivados sobre su ingreso esperado. Así, el documento identifica las medidas de adaptación a través de la elección de cultivos y la forma en que se modifica dicha elección ante los nuevos escenarios climáticos. Asimismo, se estima el ingreso condicional relacionado con los cultivos elegidos y el impacto del cambio climático sobre los ingresos esperados. El artículo se divide en tres secciones y la conclusión; en la primera, se establece la teoría relacionada con el modelo (Banco de México estructural ricardiano y el método de estimación; la segunda incluye los datos y las fuentes utilizadas en este estudio; y la tercera ofrece los resultados empíricos.

I. MARCO GENERAL: ADAPTACIÓN EN EL SECTOR AGROPECUARIO

Uno de los métodos más utilizados en la estimación de los impactos del cambio climático en la agricultura es el modelo ricardiano (MR) (De Salvo, Begalli y Signorello, 2014). El MR examina los cambios en el valor de la tierra (o los ingresos netos) ante cambios en un conjunto de variables exógenas como el clima, los suelos, la altitud y otras restricciones (Mendelsohn y Dinar, 2009; Mendelsohn, Nordhaus y Shaw, 1994). En particular, el modelo supone que los agricultores maximizan sus beneficios eligiendo una combinación óptima de insumos y productos dado el conjunto de variables exógenas fuera de su control (Mendelsohn y Dinar, 2009). De esta manera, los agricultores ajustan esta combinación de insumos y productos ante los cambios en las condiciones locales por lo que el MR captura implícitamente los procesos de adaptación en que incurren los agricultores.

Este modelo, en su versión tradicional, permite identificar los efectos potenciales del cambio climático sobre las actividades agropecuarias; sin embargo, no permite identificar de forma explícita las medidas de adaptación tomadas por los agricultores, ya que dichas medidas son consideradas endógenamente (Cline, 2007; Mendelsohn y Dinar, 2009). En este sentido, Seo y Mendelsohn (2008a) vincularon la versión tradicional del modelo

ricardiano con un modelo de adaptación explícita (Mendelsohn y Dinar, 2009). El MSR estima, en una primera etapa, la elección de cultivos realizada por los agricultores y posteriormente estima el ingreso condicional para cada elección. De este modo, el modelo estima no solamente las elecciones de adaptación realizadas por los agricultores, sino también la forma en que el cambio climático afecta el ingreso esperado (Mendelsohn y Dinar, 2009).

El MSR argumenta que los productores agropecuarios buscan maximizar sus ganancias o ingreso neto por hectárea mediante la selección de diversas opciones productivas y considerando las condiciones climáticas (Seo y Mendelsohn, 2008b; Seo, McCarl y Mendelsohn, 2010). Para captar los procesos de adaptación, el modelo debe considerar explícitamente la manera en que adoptará dichos procesos mediante el tipo de granja, tipo de riego, selección de cultivos o selección de ganado. En este estudio, el proceso de adaptación se realiza mediante la selección de cultivos. Así, la selección de cultivos por parte de los productores agropecuarios depende de las características de los productores, de los suelos y de otras variables de control y de las condiciones climáticas (Mendelsohn y Dinar, 2009). Los procesos de adaptación al cambio climático pueden entonces identificarse evaluando la selección de los productores ante diversos escenarios de temperatura y precipitación (Mendelsohn y Dinar, 2009).

La estimación del modelo estructural ricardiano se basa en la estimación en dos etapas del modelo discreto-continuo sugerido por Dubin y McFadden (1984). En la primera etapa se estima un modelo logit multinomial para la selección de cultivos. En la segunda etapa se estima un modelo de ingreso condicional para cada elección utilizando mínimos cuadrados ordinarios, incluyendo términos de corrección de selección provenientes del modelo logit multinomial.

Así, la probabilidad de selección de un cultivo se encuentra en función de su rentabilidad. Se asume que el beneficio del agricultor i de elegir el cultivo j ($j = 1, \dots, J$) es:

$$\pi_{ij} = V(K_i, S_i) + \varepsilon_j(K_i, S_i) \quad (1)$$

en la que K es un vector de características exógenas al productor y S es un vector de características del productor. De esta manera, K incluye, por ejemplo, variables climáticas y de calidad del suelo, mientras que S incluye variables como el tamaño de la granja y del hogar del productor. La ecuación de beneficios se compone de dos términos, el componente observable

V y el componente de error ε que no es observable pero que puede ser conocido por el productor agropecuario.

El productor agropecuario elegirá el cultivo que le reporte mayores beneficios. La selección de la combinación de cultivos del agricultor se define entonces como el cultivo único que le reporta mayor ingreso. Por tanto, las alternativas son mutuamente excluyentes y exhaustivas (Seo y Mendelsohn, 2008b; Seo, 2010). Así, sea $Z = (K, S)$, el productor i elige el cultivo j sobre el resto de cultivos k en el caso en que:

$$\pi_j^*(Z_i) > \pi_k^*(Z_i) \quad \forall k \neq j \tag{2}$$

o si $\varepsilon_k(Z_i) - \varepsilon_j(Z_i) < V_j(Z_i) - V_k(Z_i) \quad \forall k \neq j$

El problema se reduce entonces a:

$$\arg \max_j [\pi_1^*(Z_i), \pi_2^*(Z_i), \dots, \pi_j^*(Z_i)] \tag{3}$$

La probabilidad P_{ij} del productor i de seleccionar el cultivo j es (Mendelsohn y Dinar, 2009; Seo y Mendelsohn, 2008b; Seo, 2010):

$$P_{ij} = \Pr [\varepsilon_k(Z_i) - \varepsilon_j(Z_i) < V_j(Z_i) - V_k(Z_i)] \quad \forall k \neq j \tag{4}$$

Suponiendo que ε se distribuye idéntica e independientemente como una distribución de valor extremo tipo I (Gumbel) y que la función de beneficios puede escribirse de forma lineal en sus parámetros, entonces la probabilidad de que el productor i elija el cultivo j es (Seo y Mendelsohn, 2008b; Greene, 2002):

$$P_{ij} = \frac{e^{Z_{ij}\gamma_j}}{\sum_{k=1}^J e^{Z_{ik}\gamma_k}} \tag{5}$$

Los parámetros de la ecuación (5) pueden estimarse utilizando el método de máxima verosimilitud con base en el proceso interactivo de optimización no lineal de Newton-Raphson (Train, 2009).

Los efectos marginales que muestran la sensibilidad de la probabilidad de elección ante cambios en las variables climáticas se obtienen diferenciando la ecuación (5) respecto a las variables climáticas (z_c) de interés:

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial z_c} = P_j \left[\gamma_j - \sum_{k=1}^J P_k \gamma_k \right] \quad (6)$$

en la que es importante notar que el signo del parámetro estimado en la ecuación (5) puede diferir del signo del efecto marginal (Greene, 2002).

Dado que la ecuación de beneficios (1) se observa solamente para el cultivo seleccionado, la estimación de la ecuación de ingreso condicional se debe corregir por la posibilidad de existencia de sesgo de selección, y por tanto los coeficientes estimados pueden estar sesgados (Kurukulasuriya y Mendelsohn, 2008; Seo y Mendelsohn, 2008a; Heckman, 1979). Dado que los productores maximizan sus beneficios sujetos a la elección del cultivo, el error de la ecuación en la segunda etapa puede estar correlacionado con el error de la ecuación de la primera etapa. Este problema puede enfrentarse mediante la inclusión de términos de corrección en la ecuación de ingreso condicional (Dubin y McFadden, 1984; Seo y Mendelsohn, 2008a):

$$\pi_j = X_j \varphi_j + \sigma \cdot \sum_{i \neq j}^J \rho_i \left(\frac{P_i \ln P_i}{1 - P_i} + \ln P_j \right) + \omega_j \quad (7)$$

en la que X_i es una matriz de variables independientes que incluyen las variables climáticas, de suelo y características de los hogares; φ_j es el vector de parámetros asociados a las variables en X_i , y el segundo término de la ecuación es el de corrección de sesgo, en el que σ es el error estándar de la ecuación de beneficio y ρ_i es el coeficiente de correlación entre la ecuación de beneficios y la ecuación de elección. ω_j es el término de error.

Los efectos marginales del ingreso neto del productor i ante un cambio de las variables climáticas, bajo el supuesto de una relación cuadrática entre el ingreso neto y las variables climáticas, se obtiene diferenciando a la ecuación (7) respecto de la variable climática de interés (Seo y Mendelsohn, 2008c):

$$\frac{\partial \pi_j}{\partial z_c} = \varphi_{c1} + 2 * \varphi_{c2} z_c + \Gamma \quad (8)$$

en la que z_c representa a la variable climática respectiva. El tercer término de la ecuación, Γ , representa los cambios en los términos de corrección de sesgo que implica la modificación en las probabilidades de elección ante cambios en la variable z_c (Hoffmann y Kassouf, 2005).

El ingreso esperado corresponde entonces a la suma de los ingresos condicionales de cada cultivo multiplicada por la probabilidad de selección (Kurukulasuriya y Mendelsohn, 2008). En este caso, la probabilidad (P_{ij}) de seleccionar el cultivo j se estima a partir de la ecuación (5) y el ingreso condicional se estima mediante la ecuación (7). En este caso, las variables climáticas modifican tanto la probabilidad de selección como el ingreso condicional de cada selección (Dinar y Mendelsohn, 2012). De esta manera, el ingreso esperado con el clima actual es:

$$Y(C_0) = \sum_{j=1}^J P_j(C_0) * Q_j(C_0) \quad (9)$$

en el que C_0 denota las condiciones climáticas en el momento 0 y Q_j el ingreso condicional del cultivo j .

El cambio en el bienestar se puede calcular entonces como la diferencia entre el ingreso esperado bajo las condiciones climáticas actuales (C_0) y el ingreso bajo las nuevas condiciones climáticas (C_{cc}). Por tanto, el cambio en el bienestar se define como:

$$\Delta W_i = Y(C_{cc}) - Y(C_0) \quad (10)$$

II. DATOS

Los datos de superficie agrícola, número de unidades agropecuarias y características de los hogares y de los productores provienen del IV Censo Nacional Agropecuario 2012 (CNA) disponible en el Instituto Nacional de Estadística e Informática de Perú.¹ Los datos del valor bruto de la producción, rendimiento, precio por cultivo y por departamento para el año 2012 provienen de las series históricas de producción agrícola de la Oficina de Estudios Económicos y Estadísticos (OEEE) del Ministerio de Agricultura y Riego (Minagri).² Los datos de temperatura y precipitación promedio representativos para el periodo 1950-2000, así como los datos de altitud, provienen de la base WorldClim,³ la cual se generó mediante la interpolación de los datos medios mensuales del clima de las estaciones meteorológicas en una base de celdas de 30 arcos segundos de resolución (resolución 1 km²) (Hijmans *et al.*, 2005). Finalmente, los

¹ <http://iinei.inei.gob.pe/microdatos/>

² http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult

³ <http://worldclim.org/>

datos sobre la calidad del suelo para la producción de cultivos provienen de la Base de Datos Armonizada de los Suelos del Mundo v1.2 de la FAO⁴ (Fischer *et al.*, 2008), la cual consiste en una base de celdas de 30 arcos segundos.

1. *Muestreo*

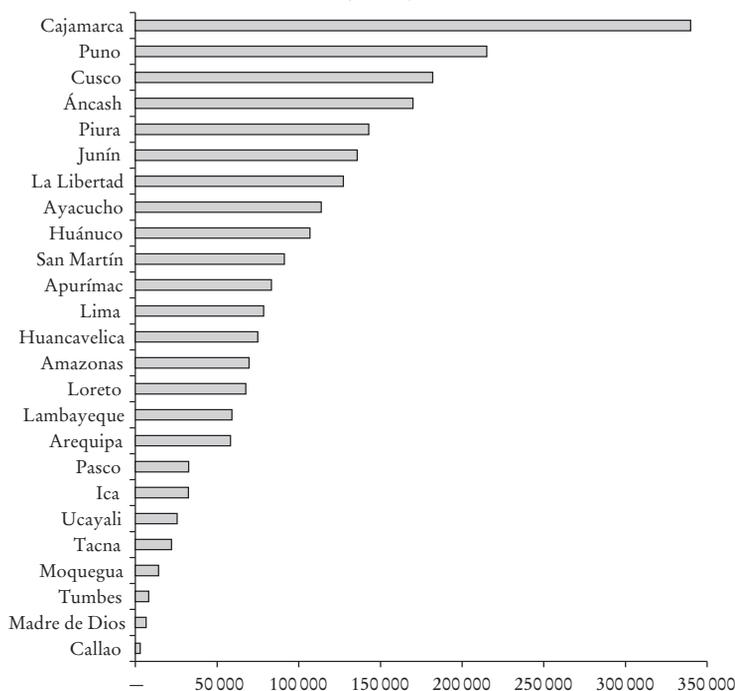
El CNA contiene información de 2260973 productores agropecuarios distribuidos principalmente en los departamentos de Cajamarca, Puno, Cusco, Ancash, Piura y Junín (véase la gráfica 1). Por motivos computacionales se decidió tomar una muestra aleatoria de 200 000 productores, usando como estrato la proporción de productores por departamentos del Perú (Lumley, 2010). La inclusión de observaciones de todos los departamentos en una sola estimación permite cubrir una gran variabilidad climática y considerar los cultivos representativos.

2. *Otros*

La información por productor agropecuario se encuentra dividida por parcela y en cada parcela se identifican los cultivos. Con la finalidad de mantener al productor agropecuario como unidad de análisis se agregaron las parcelas, recalculando variables dicotómicas como riego y electricidad mediante una media ponderada por tamaño de la parcela (por ejemplo, en el caso en que un agricultor tiene tres parcelas y en dos de ellas usa riego, la variable riego toma el valor de 2/3).

Los datos contenidos en el CNA no proveen valores económicos, razón por la que se utilizaron los datos relativos al rendimiento promedio y precio por cultivo y departamento para estimar el valor bruto de la producción por unidad agropecuaria. La base de datos de los rendimientos y precio de los cultivos no incluye el número total de cultivos incluidos en el censo, por lo que fue necesario eliminar aquellos cultivos de los que no fue posible estimar el valor bruto de la producción. Por otro lado, el CNA registra una variable categórica que enumera los cultivos por productor por orden de importancia; es por ello que las observaciones relativas a los agricultores cuyos tres cultivos principales no se encuentren en la base de rendimientos fueron eliminadas de la muestra.

⁴ <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/base-de-datos-armonizada-de-los-suelos-del-mundo-v12/es/>

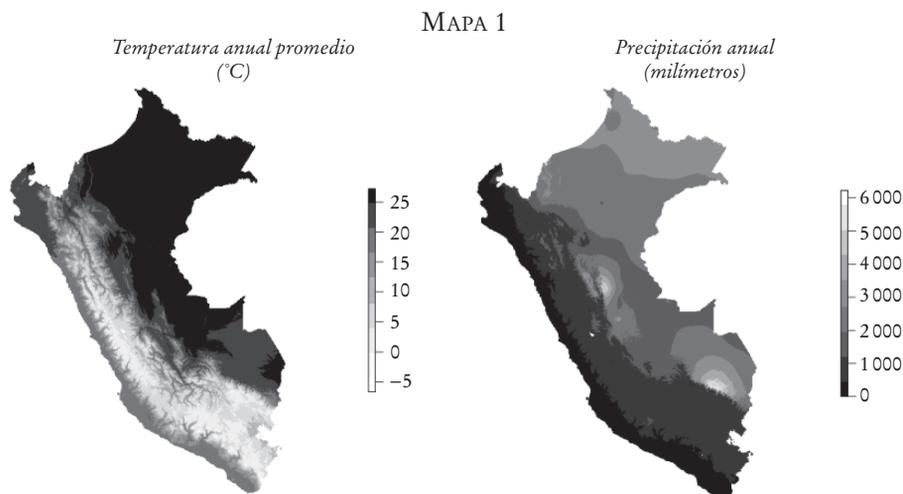
GRÁFICA 1. *Número de productores agropecuarios por departamento (2012)*

FUENTE: elaboración propia con base en el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) y el Ministerio de Agricultura y Riego (Minagri) (2013), “Resultados Definitivos. IV Censo Nacional Agropecuario 2012”, INEI, Lima.

3. *Variables climáticas, altitud y suelo*

La base de datos del CNA contiene información geográfica del productor agropecuario, por lo que es posible asignarle una correspondencia con variables climáticas, de suelo y de altitud con relativa precisión. Los datos de temperatura y precipitación están disponibles cada mes y corresponden a interpolaciones de datos observados para el periodo 1950-2000 (Hijmans *et al.*, 2005); sin embargo, es común que se sugiera la agregación de la información mensual por estaciones (Kurukulasuriya *et al.*, 2006; Mendelsohn, Dinar y Sanghi, 2001) (véase el mapa 1).

Se incluyen siete variables que clasifican la calidad del suelo para la producción de cultivos. Las variables miden la disponibilidad de nutrientes, la capacidad de retención de los nutrientes, las condiciones de enraizamiento,



FUENTE: elaboración propia con datos provenientes de Hijmans, *et al.* (2005). Disponible en <http://worldclim.org/>

^a Los datos son interpolaciones de datos observados representativos para el periodo 1950-2000.

la disponibilidad de oxígeno para las raíces, el exceso de sales, la toxicidad y la manejabilidad de la tierra (véase el cuadro 1).

III. RESULTADOS

La muestra final incluye un total de 110277 observaciones. La selección de los principales cultivos se realizó en función de su valor bruto, a partir de ello se eligieron los 10 principales (véase cuadro 2).

El principal cultivo es la papa blanca, que representa la elección de un cuarto de los productores, seguido del café y de la papa nativa. A partir de esta información es posible estimar un modelo logit multinomial que permite relacionar las probabilidades de elección de los cultivos a variables climáticas y a las distintas características de los productores, donde la elección de cultivos es mutuamente excluyente (Seo y Mendelsohn, 2008b; Kurukulasuriya y Mendelsohn, 2008). Las estimaciones incluyen la temperatura (en grados centígrados) y la temperatura al cuadrado, así como la precipitación (en milímetros) y la precipitación al cuadrado, para las temporadas de verano e invierno. Los términos cuadráticos intentan captar el efecto no lineal de la temperatura y la precipitación sobre el rendimiento de los cultivos (Reilly *et al.*, 1996). El modelo también incluye siete variables de calidad del suelo para el cultivo, el logaritmo de la superficie agrícola, el logaritmo

CUADRO 1. *Variables de calidad del suelo para la producción de cultivos*

	<i>Calidad del suelo</i>	<i>Características del suelo</i>
SQ1	Disponibilidad de nutrientes	La textura del suelo, carbono orgánico del suelo, pH del suelo, el total de las bases intercambiables
SQ2	Capacidad de retención de nutrientes	Carbono orgánico del suelo, textura del suelo, saturación de bases, capacidad de intercambio catiónico del suelo y de la fracción arcilla
SQ3	Condiciones de enraizamiento	Texturas del suelo, densidad aparente, fragmentos gruesos, propiedades de vértice del suelo y fases de suelo que afectan a la penetración de raíces y la profundidad del suelo y volumen de suelo
SQ4	Disponibilidad de oxígeno para las raíces	Drenaje del suelo y de las fases de suelo que afectan el drenaje
SQ5	Exceso de sales	La salinidad del suelo, sodicidad del suelo y las fases del suelo que influyen en condiciones salinas
SQ6	Toxicidad	El carbonato de calcio y yeso
SQ7	Manejabilidad	La textura del suelo, la profundidad/volumen efectivo del suelo, y las fases de suelo que limitan el manejo del suelo (profundidad del suelo, afloramiento de roca, pedregosidad, grava/concreciones y capas duras)

FUENTE: Base de Datos Armonizada de los Suelos del Mundo v1.2 de la FAO.

CUADRO 2. *Productores agropecuarios por principales cultivos*

<i>Cultivo</i>	<i>Número de productores agropecuarios</i>	<i>Participación en el total de la muestra (porcentaje)</i>
Papa blanca	27 018	25
Café	17 102	16
Papa nativa	14 784	13
Maíz amiláceo	13 662	12
Alfalfa	11 569	10
Maíz amarillo duro	7 806	7
Plátano	7 498	7
Yuca	5 172	5
Arroz cáscara	4 232	4
Uva	1 434	1
Total	110 277	100

FUENTE: elaboración propia.

del tamaño del hogar, una variable dicotómica de uso de electricidad para la producción, la variable de riego y una variable que mide la escolaridad del jefe del hogar. La categoría base es la papa blanca, por lo que los resultados deben interpretarse en relación con este cultivo (véase el cuadro 3).⁵

⁵ Los coeficientes se relacionan con el logaritmo de la razón de momios (*odds ratio*).

CUADRO 3. Modelo logit multinomial de elección de cultivo^a

Variables	Alfalfa	Arroz	Café	Maíz amarillo duro	Maíz amiláceo	Papa nativa	Plátano	Uva	Yuca
$temp_{over}$	1.282*** (0.0688)	-3.540*** (0.2132)	-7.913*** (0.2657)	1.104*** (0.0959)	-0.356*** (0.0768)	-0.952*** (0.0877)	-3.065*** (0.1970)	3.718*** (0.2138)	0.089 (0.1522)
$temp_{ver}^2$	-0.034*** (0.0021)	0.054*** (0.0041)	0.143*** (0.0062)	-0.020*** (0.0025)	0.009*** (0.0023)	0.040*** (0.0037)	0.063*** (0.0042)	-0.084*** (0.0054)	-0.015*** (0.0036)
$temp_{inv}$	-1.498*** (0.0627)	3.984*** (0.2695)	9.514*** (0.2680)	-1.346*** (0.0984)	0.474*** (0.0680)	0.552*** (0.0763)	3.063*** (0.2148)	-3.722*** (0.2461)	0.291 (0.1686)
$temp_{inv}^2$	0.049*** (0.0020)	-0.065*** (0.0061)	-0.185*** (0.0065)	0.040*** (0.0028)	-0.001 (0.0022)	-0.033*** (0.0036)	-0.055*** (0.0049)	0.093*** (0.0073)	0.007 (0.0043)
$prec_{over}$	0.024*** (0.0026)	0.054*** (0.0031)	0.062*** (0.0033)	0.051*** (0.0028)	0.040*** (0.0029)	0.012* (0.0048)	0.085*** (0.0029)	0.093*** (0.0062)	0.075*** (0.0029)
$prec_{ver}^2$	0.000*** (0.0000)	0.000*** (0.0000)	0.000*** (0.0000)	-0.0002*** (0.0000)	0.000*** (0.0000)	0.000 (0.0000)	-0.0002*** (0.0000)	-0.001*** (0.0001)	-0.0002*** (0.0000)
$prec_{inv}$	-0.068*** (0.0047)	-0.024*** (0.0047)	-0.011* (0.0045)	-0.062*** (0.0041)	-0.068*** (0.0037)	-0.098*** (0.0053)	-0.083*** (0.0043)	-0.133*** (0.0105)	-0.064*** (0.0043)
$prec_{inv}^2$	0.000 (0.0001)	0.000*** (0.0000)	0.0002*** (0.0000)	0.000*** (0.0000)	0.001*** (0.0000)	0.0004*** (0.0001)	0.001*** (0.0000)	0.001*** (0.0001)	0.0005*** (0.0000)
Altitud	0.000 (0.0000)	-0.006*** (0.0002)	-0.003*** (0.0001)	-0.001*** (0.0001)	0.001*** (0.0001)	0.001*** (0.0000)	-0.003*** (0.0001)	-0.002*** (0.0001)	-0.004*** (0.0001)
SQ1	-0.234*** (0.0366)	0.079 (0.0769)	0.161** (0.0574)	0.308*** (0.0521)	0.268*** (0.0286)	0.290*** (0.0323)	0.203*** (0.0616)	-1.467*** (0.1339)	0.356*** (0.0602)
SQ2	-0.756*** (0.0516)	-0.310*** (0.0908)	-0.041 (0.0729)	-0.304*** (0.0655)	-0.918*** (0.0454)	-0.370*** (0.0479)	-0.219*** (0.0769)	0.614*** (0.1328)	-0.016 (0.0759)

SQ3	0.377* (0.1579)	0.142 (0.1549)	-0.112 (0.1460)	-0.484** (0.1474)	0.362* (0.1513)	2.558*** (0.1689)	-0.117 (0.1481)	0.298 (0.2435)	0.128 (0.1547)
SQ4	0.815*** (0.1391)	-1.375*** (0.2012)	-3.215*** (0.2597)	-1.121*** (0.1949)	0.038 (0.1947)	0.455** (0.1586)	-1.000*** (0.1960)	0.317 (0.2215)	-1.078*** (0.1967)
SQ5	0.259* (0.1020)	-1.457*** (0.1532)	-81.868 (13332)	-0.585*** (0.1137)	0.522*** (0.1380)	0.453 (0.2551)	-2.094*** (0.2229)	0.436*** (0.1165)	-1.751*** (0.2142)
SQ6	0.115 (0.1770)	2.116*** (0.3238)	75.702 (13332)	1.164*** (0.3043)	-6.978*** (0.4161)	-0.377 (0.3011)	2.041*** (0.3573)	-2.398*** (0.4368)	1.808*** (0.3546)
SQ7	-0.602*** (0.1584)	0.170 (0.1538)	0.159 (0.1472)	0.463** (0.1476)	-0.268 (0.1520)	-2.768*** (0.1697)	0.326* (0.1483)	-0.082 (0.2412)	-0.009 (0.1553)
Log(superficie agrícola)	0.077*** (0.0099)	0.240*** (0.0221)	0.291*** (0.0168)	0.055*** (0.0145)	-0.208*** (0.0081)	-0.006 (0.0093)	0.120*** (0.0186)	-0.319*** (0.0248)	0.034 (0.0182)
Log(tamaño del hogar)	-0.224*** (0.0215)	-0.255*** (0.0433)	-0.218*** (0.0312)	-0.151*** (0.0296)	-0.241*** (0.0180)	-0.091*** (0.0209)	-0.116*** (0.0348)	-0.546*** (0.0591)	-0.036 (0.0345)
Electricidad (0 si no usa y 1 si usa)	0.606*** (0.1085)	-0.757** (0.2340)	0.830*** (0.1726)	-0.164 (0.1723)	-0.109 (0.1308)	-0.432*** (0.1228)	-0.051 (0.2024)	0.781*** (0.2279)	-0.141 (0.2267)
Riego	1.314*** (0.0362)	5.551*** (0.1325)	-1.467*** (0.0643)	-0.212*** (0.0558)	0.132*** (0.0260)	-2.423*** (0.0421)	0.222** (0.0853)	-0.027 (0.2722)	-0.057 (0.0730)
Nivel de educación alcanzado	0.121*** (0.0066)	0.079*** (0.0140)	0.115*** (0.0110)	0.022* (0.0100)	0.019** (0.0058)	-0.014* (0.0069)	0.076*** (0.0122)	0.225*** (0.0166)	0.006 (0.0123)
AIC	354.63								
Log Likelihood	-112755								
Número de observaciones	110277								

^a Cultivo base: papa blanca. ***:p < 0.001, **:p < 0.01, *:p < 0.05. Errores estándar entre paréntesis.

Los resultados del modelo logit multinomial se resumen en el cuadro 3. La estimación muestra, por ejemplo, que la altitud estimula la elección del maíz amiláceo y la papa nativa en relación con la papa blanca, mientras que desmotiva la elección del resto de los cultivos, en relación con la papa blanca; todo ello con excepción del cultivo de la alfalfa, en el que el coeficiente es estadísticamente no significativo, lo que implica que la altitud no es un factor que afecte la elección de la alfalfa en relación con la elección de papa blanca. El tamaño de la superficie agrícola motiva la elección de alfalfa, arroz, café, maíz amarillo duro y de plátano, mientras que desmotiva la elección de maíz amiláceo y de uva, en relación con la elección de papa blanca. El tamaño del hogar desmotiva la elección de todos los cultivos en comparación con el de la papa blanca. Asimismo, las variables de calidad del suelo tienden a ser relevantes para la elección de los cultivos frente a la elección de la papa blanca.

Las unidades productivas que hacen uso de electricidad para la realización de sus trabajos agrícolas tienen mayor propensión a elegir alfalfa, café y uva, mientras que su uso es un desestimulante de la elección de arroz y papa nativa, en relación con la papa blanca. Asimismo, la capacidad de riego de las unidades productivas desmotiva la elección del café, el maíz amarillo duro y la papa nativa, motivando la elección de la alfalfa, el arroz, el maíz amiláceo y el plátano, en relación con la papa blanca. Finalmente, el nivel de escolaridad alcanzado por el productor motiva en general la elección de la mayoría de los cultivos en relación con la papa blanca, con excepción de la papa nativa.

Las variables climáticas son relevantes para la elección de cultivos. De hecho, en relación con la papa blanca, la mayoría de los cultivos responden a las variables climáticas para las temporadas consideradas. Es útil calcular los efectos marginales⁶ para tener una idea de los cambios en la probabilidad de elección ante los cambios en las variables climáticas por temporada y totales (véase el cuadro 4). Los efectos marginales son, en general, mayores en valor absoluto para los cambios de temperatura que para los cambios en precipitación. Se puede observar que un aumento de temperatura afecta negativamente la probabilidad de elección de la papa blanca, la alfalfa, el arroz, el café, la papa nativa, la uva y la yuca, mientras que favorece la probabilidad de elección del maíz amarillo duro, el maíz amiláceo y el plátano. Sin embargo, es importante notar que la temporada en donde ocurre el

⁶ Que mide el cambio promedio de la probabilidad ante cambios en la variable climática.

CUADRO 4. *Efectos marginales de las variables climáticas sobre los cultivos*

Variables	Temperatura (puntos base ante un aumento de 1°C)			Precipitación (puntos base ante el aumento de 1 mm)		
	Verano	Invierno	Total	Verano	Invierno	Total
Papa blanca	0.025	-0.038	-0.013	-0.0004	0.0053	0.0049
Alfalfa	0.034	-0.038	-0.004	-0.0007	-0.0021	-0.0028
Arroz	-0.016	0.015	-0.002	-0.0001	0.0007	0.0006
Café	-0.088	0.074	-0.014	0.0001	0.0002	0.0002
Maíz amarillo duro	0.04	-0.023	0.017	-0.0001	-0.0002	-0.0003
Maíz amiláceo	-0.003	0.031	0.028	0.0000	-0.0002	-0.0003
Papa nativa	-0.02	0.004	-0.015	0.0002	-0.0029	-0.0026
Plátano	0.026	-0.012	0.014	0.0006	-0.0004	0.0002
Uva	0.003	-0.007	-0.005	0.0002	-0.0005	-0.0003
Yuca	-0.001	-0.006	-0.007	0.0002	0.0002	0.0004

FUENTE: elaboración propia con base en los resultados del modelo logit multinomial y la ecuación (6).

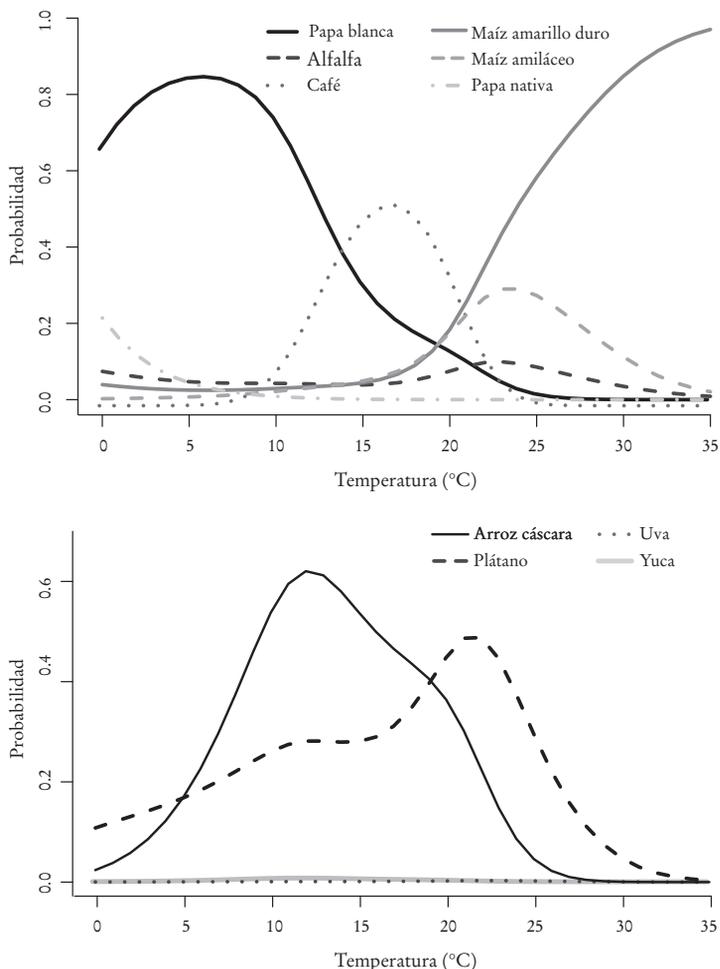
aumento ricardiano de temperatura es relevante; por ejemplo, en el caso de la papa blanca, si el aumento de temperatura ocurre sólo durante el verano, la probabilidad de elección aumenta; sin embargo, si ocurre únicamente en invierno, la probabilidad de elección decrece.

En el caso de un cambio en los niveles de precipitación, un incremento de 1 mm, aumenta la probabilidad de elección de la papa blanca, el arroz, el café, el plátano y la yuca, desmotivando la elección del resto. También en este caso es relevante la temporada en que ocurra el cambio de los patrones de precipitación. En el caso de que el cambio climático genere una disminución de los niveles de precipitación, la elección de los productores se moverá en dirección opuesta.

Es posible tener una noción más clara de los efectos de la temperatura y la precipitación sobre la probabilidad de elección tomando las probabilidades estimadas por el modelo frente a un rango de valores climáticos. La gráfica 2 muestra la forma en que se modifica la probabilidad de elección de los cultivos dentro de un rango de temperatura de entre 0 y 35°C.⁷ La gráfica muestra que el cultivo con mayor probabilidad de elección, ante bajas temperaturas, es el de la papa blanca, seguido por el de la papa nativa y a medida que aumenta la temperatura, la elección del cultivo de ambos tipos de papa decrece en favor del cultivo del café, del de las dos variedades de maíz consideradas y, en menor medida, del cultivo de alfalfa. El maíz amarillo duro es el cultivo con mayor probabilidad de elección frente a altas temperaturas.

⁷ En estos gráficos la temperatura por temporada se ajusta para ser igual durante el año.

GRÁFICA 2. Probabilidad de elección de cultivo y temperatura anual

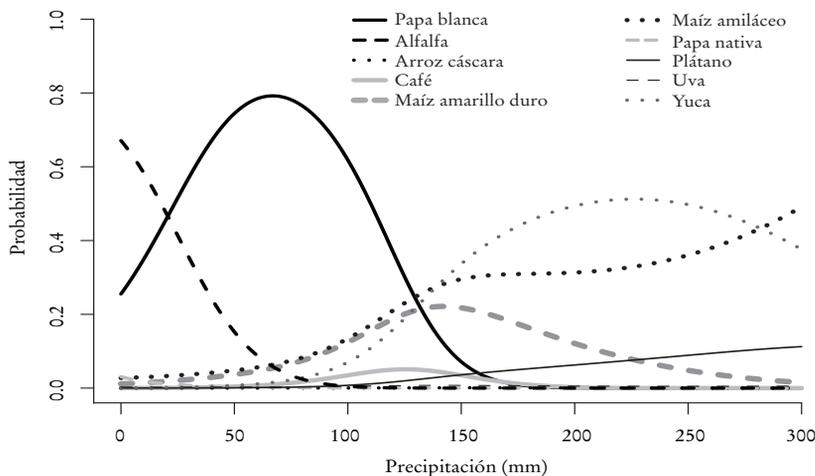


FUENTE: elaboración propia con base en los resultados del modelo logit multinomial.

El resto de los cultivos muestra una probabilidad de elección menor a 0.10, donde la yuca tiene una tendencia similar al de la papa blanca, decreciendo frente a los aumentos de temperatura, mientras que el plátano aumenta su probabilidad de elección ante los aumentos de temperatura. El arroz y la uva tienen una probabilidad de elección prácticamente de cero (menor a 0.0005).

La gráfica 3 muestra la forma en que cambia la probabilidad de elección dentro de un rango de precipitaciones de entre 0 y 300 mm mensual pro-

GRÁFICA 3. Probabilidad de elección de cultivo por precipitación anual



FUENTE: elaboración propia con base en los resultados del modelo logit multinomial.

medio.⁸ Esta gráfica muestra que un bajo nivel de precipitaciones favorece la elección del cultivo de la papa blanca y de la alfalfa. A medida que incrementa el nivel de precipitación aumenta la elección de las dos especies de maíz, amarillo duro y amiláceo, así como de yuca y plátano, aunque solamente el maíz amiláceo y el plátano mantienen un aumento de probabilidad de elección en todo el rango considerado, mientras que el resto de los cultivos muestran un punto máximo y disminuyen posteriormente.

El cuadro 5 presenta los resultados de la segunda etapa de las regresiones del ingreso por cultivo, aproximados por el valor bruto de la producción. La ecuación especifica el logaritmo del ingreso (en soles) como variable dependiente y las variables incluidas en el modelo logit multinomial, así como el precio del cultivo (en soles por kilogramo). El sesgo de selección se corrige como se muestra en la ecuación (8), por lo que los coeficientes deben ser interpretados como semielasticidades. Las ecuaciones fueron estimadas mediante mínimos cuadrados ordinarios.

Las variables climáticas tienen comportamientos mixtos en las ecuaciones de ingreso. La temperatura de verano es relevante para la ecuación de ingreso de los cultivos de la alfalfa, el arroz, las dos especies de maíz, la papa nativa, el plátano y la yuca. La precipitación en verano incide sobre los in-

⁸ En estas gráficas la precipitación por temporada se ajusta para ser igual durante el año.

CUADRO 5. Regresiones del
(Variable dependiente)

<i>Variables</i>	<i>Papa blanca</i>	<i>Alfalfa</i>	<i>Arroz</i>	<i>Café</i>
Constante	1.5407*** (0.3469)	3.1389*** (0.534)	-5.608 (2.998)	13.4204*** (0.8993)
$temp_{ver}$	-0.0129 (0.053)	-0.6124*** (0.1026)	1.1614** (0.3571)	-0.1184 (0.3171)
$temp_{ver}^2$	-0.0032 (0.0022)	0.0165*** (0.0032)	-0.0231*** (0.0063)	-0.0121 (0.0063)
$temp_{inv}$	0.0256 (0.044)	0.5302*** (0.1004)	-0.4523 (0.3202)	-0.4669 (0.3823)
$temp_{inv}^2$	0.0025 (0.0018)	-0.0164*** (0.0034)	0.0088 (0.0062)	0.0194* (0.008)
$prec_{ver}$	-0.0171*** (0.002)	-0.0147*** (0.0021)	-0.0035 (0.0025)	0.0040* (0.0013)
$prec_{ver}^2$	0.0001*** (0.000)	0.0001*** (0.000)	0.000 (0.000)	-0.0000* (0.000)
$prec_{inv}$	-0.0018 (0.0033)	-0.0047 (0.0049)	-0.0136*** (0.0041)	-0.0174*** (0.0027)
$prec_{inv}^2$	0.000 (0.000)	0.0002*** (0.000)	0.0001*** (0.000)	0.0001*** (0.000)
Altitud	0.0002* (0.0001)	0.0001 (0.0001)	0.0003 (0.0002)	-0.0017*** (0.0001)
SQ1	0.1927*** (0.0153)	0.0887** (0.0325)	0.0308 (0.036)	-0.0829*** (0.0158)
SQ2	-0.0677* (0.030)	0.2770*** (0.054)	-0.1692*** (0.0461)	0.0047 (0.0193)
SQ3	0.0385 (0.0689)	0.2421** (0.0838)	-0.1680*** (0.0447)	-0.0802*** (0.0178)
SQ4	0.0892 (0.0978)	-0.1449* (0.0734)	-0.0266 (0.0432)	0.2410 (0.1597)
SQ5	0.3431*** (0.0536)	0.0643 (0.0399)	0.5176*** (0.0804)	
SQ6	-0.5164*** (0.1264)	-0.4144*** (0.0734)	-0.4354*** (0.0917)	
SQ7	-0.067 (0.0692)	-0.1922* (0.0855)	0.1778*** (0.030)	0.0363 (0.0185)
Log (superficie agrícola)	0.7392*** (0.0072)	0.7496*** (0.009)	0.7684*** (0.0154)	0.6306*** (0.012)

ingreso condicional por cultivo
en logaritmos)

<i>Maíz amarillo duro</i>	<i>Maíz amiláceo</i>	<i>Papa nativa</i>	<i>Plátano</i>	<i>Uva</i>	<i>Yuca</i>
-2.9038** (0.9138)	-5.1624*** (0.772)	-4.8965*** (0.9163)	-2.7785 (1.5142)	1.6653 (3.692)	-1.0987 (1.356)
1.3808*** (0.1571)	-1.0620*** (0.0814)	-0.2334 (0.1299)	-1.8586*** (0.3582)	-0.4309 (0.7739)	0.7829** (0.2659)
-0.0296*** (0.0029)	0.0384*** (0.0029)	0.0133* (0.0068)	0.0435*** (0.0074)	0.0134 (0.0185)	-0.0220*** (0.0055)
-1.1235*** (0.1234)	0.9810*** (0.0785)	0.2419* (0.0989)	2.0477*** (0.3465)	0.188 (0.8256)	-0.4825* (0.2271)
0.0254*** (0.0027)	-0.0300*** (0.0025)	-0.0059 (0.0061)	-0.0475*** (0.0074)	-0.0016 (0.0228)	0.0111* (0.0048)
-0.0069*** (0.0014)	0.0022 (0.0023)	0.0069 (0.006)	0.0061* (0.0025)	0.0063 (0.0139)	-0.0064*** (0.0018)
0.0000*** (0.000)	0.0000 (0.000)	0.0000 (0.000)	0.0000 (0.000)	0.0000 (0.0001)	0.0000 (0.0001)
-0.0068*** (0.0019)	-0.0056 (0.003)	-0.0178* (0.0085)	-0.0107*** (0.0024)	-0.0135 (0.0423)	0.0188*** (0.0019)
0.0000* (0.000)	0.000 (0.000)	0.0001* (0.0001)	0.0000** (0.000)	0.0001 (0.0003)	-0.0000*** (0.000)
0.0000 (0.0001)	0.0008*** (0.0001)	0.0012*** (0.0002)	-0.0002 (0.0002)	0.0005 (0.0004)	-0.0008*** (0.0002)
-0.0149 (0.0234)	0.0983*** (0.0221)	0.1191*** (0.0313)	-0.0801** (0.0266)	0.2801 (0.2916)	0.1750*** (0.0291)
-0.0072 (0.0304)	-0.4371*** (0.0555)	-0.2741*** (0.0421)	-0.1135** (0.031)	-0.1902 (0.1991)	-0.1171** (0.0383)
0.0373 (0.0355)	-0.0395 (0.0986)	0.3347 (0.2145)	0.0688* (0.0327)	-0.2911 (0.3315)	-0.0402 (0.0583)
0.0878*** (0.0223)	0.4453*** (0.1103)	-0.1060 (0.0769)	0.1460*** (0.0214)	-0.5072 (0.2786)	-0.0225 (0.0225)
0.3154*** (0.0494)	0.294 (0.2235)	-0.5252*** (0.1204)	-0.023 (0.1204)	-0.1331 (0.1471)	-0.5929** (0.1897)
-0.3861*** (0.0455)	-0.8667 (0.7211)	0.7910*** (0.1367)	-0.208 (0.1886)	0.7197 (0.5673)	0.5112** (0.1914)
-0.0072 (0.0417)	0.0594 (0.0984)	-0.3721 (0.2283)	0.0056 (0.0273)	0.1455 (0.3158)	0.1007 (0.0545)
-0.7324*** (0.0085)	0.7559*** (0.0142)	0.7052*** (0.0062)	0.5877*** (0.0133)	0.9168*** (0.0621)	0.4730*** (0.0167)

CUADRO 5

<i>Variables</i>	<i>Papa blanca</i>	<i>Alfalfa</i>	<i>Arroz</i>	<i>Café</i>
Log (tamaño del hogar)	-0.0489*** (0.0099)	0.0207 (0.019)	-0.0518** (0.0185)	0.0178 (0.0099)
Electricidad (0 si no usa y 1 si usa)	-0.0354 (0.0504)	-0.0456 (0.0575)	0.2787** (0.0913)	0.0701 (0.0387)
Riego	0.0254*** (0.0029)	-0.0094 (0.0084)	0.0255*** (0.0063)	0.0055 (0.0049)
Nivel de educación alcanzado	-0.0200 (0.026)	-0.4605*** (0.125)	0.0829 (0.4232)	0.0177 (0.1012)
Precio	0.2830*** (0.0358)	2.3948*** (0.1675)	-0.0550 (0.1682)	0.0288*** (0.0085)
$\lambda_{papa\ blanca}$		1.2225*** (0.2610)	-1.0779 (0.6525)	0.2528 (0.1552)
$\lambda_{alfalfa}$	0.3780*** (0.0941)		0.3016 (0.2551)	1.2356*** (0.2646)
λ_{arroz}	-2.0767*** (0.2041)	-1.6882*** (0.2485)		-0.3053* (0.1351)
$\lambda_{café}$	-0.2324** (0.0787)	-0.1124 (0.2474)	0.5223** (0.1592)	
$\lambda_{maíz\ amarillo\ duro}$	-0.7432* (0.3550)	0.2342 (0.3574)	1.7392*** (0.3058)	0.1117 (0.1611)
$\lambda_{maíz\ amiláceo}$	0.2160 (0.1302)	-0.2884* (0.1372)	0.0163 (0.2661)	0.3626 (0.2138)
$\lambda_{papa\ nativa}$	0.4855*** (0.0724)	0.5157*** (0.1492)	-2.9159** (1.0008)	-1.2234*** (0.3035)
$\lambda_{plátano}$	1.9630*** (0.2898)	0.4603 (0.5950)	0.7640** (0.2508)	2.1318*** (0.1901)
λ_{yuca}	0.0116 (0.2203)	0.3097 (0.1586)	1.2800*** (0.1730)	-2.2614*** (0.5460)
λ_{yuca}	0.0305 (0.3103)	-0.1986 (0.5211)	-0.5629 (0.4414)	-0.1437 (0.2856)
R^2	0.6767	0.7188	0.8247	0.6535
R^2 ajustada	0.6764	0.7181	0.8234	0.6529
Observaciones	27 018	11 569	4 232	17 102

FUENTE: elaboración propia.

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$. Errores estándar entre paréntesis.

(conclusión)

<i>Maíz amarillo duro</i>	<i>Maíz amiláceo</i>	<i>Papa nativa</i>	<i>Plátano</i>	<i>Uva</i>	<i>Yuca</i>
-0.0618*** (0.0138)	-0.0761*** (0.0154)	-0.0031 (0.0128)	-0.0681*** (0.0138)	0.0319 (0.0700)	-0.0590*** (0.0173)
-0.0582 (0.0874)	-0.1183 (0.0724)	-0.1034 (0.0817)	0.0408 (0.0709)	-0.1898 (0.1745)	0.0366 (0.117)
0.0320*** (0.0048)	0.0012 (0.0039)	0.0001 (0.0042)	0.0453*** (0.0076)	-0.0382 (0.0337)	0.0047 (0.0067)
0.0451 (0.599)	-0.1742*** (0.0419)	-0.0526 (0.1935)	-0.0288 (0.0911)	1.2531 (1.4252)	0.0093 (0.0846)
0.2956*** (0.0535)	1.1722*** (0.0287)	0.4976*** (0.034)	1.0138*** (0.1117)	0.4285*** (0.1178)	1.3449*** (0.0642)
-1.0761*** (0.1631)	-0.7518*** (0.1905)	-0.3000 (0.3130)	-1.2703*** (0.3293)	0.4957 (1.2304)	-0.7873** (0.2799)
0.7679*** (0.1150)	-1.1318*** (0.1448)	0.3620* (0.1471)	-0.7973** (0.2762)	0.2467 (0.7949)	-0.2458 (0.2157)
-0.3656** (0.1135)	0.6723* (0.3391)	-0.0876 (2.1992)	-0.2297 (0.1739)	0.3010 (0.5937)	-0.1254 (0.1805)
0.2036** (0.0708)	-0.4588*** (0.0937)	0.2979 (0.2496)	0.0023 (0.1083)	-1.0364 (2.8165)	0.2606* (0.1134)
	1.7378** (0.6029)	-0.7039 (0.8852)	-0.9411** (0.3072)	0.3126 (0.8443)	-0.3483 (0.3368)
0.3128* (0.1256)		0.0044 (0.1147)	2.5240*** (0.4258)	0.1242 (0.7095)	2.3737*** (0.3232)
-0.1262 (0.2055)	0.1135 (0.1240)		0.7452 (0.7510)	-1.0445 (3.3763)	-1.3894* (0.6297)
-0.0238 (0.2196)	2.1045*** (0.5046)	4.4470*** (1.5008)		1.0745 (1.416)	-0.5939* (0.2589)
0.633*** (0.1221)	-0.0930 (0.3876)	-2.0881 (1.1982)	1.2952*** (0.3311)		0.6769* (0.3186)
-0.4383 (0.2555)	-2.2825*** (0.4970)	-2.0048 (1.0416)	-1.6410*** (0.3667)	-0.1295 (1.0577)	
0.7910	0.7568	0.6817	0.5418	0.8096	0.5505
0.7902	0.7562	0.6810	0.5399	0.8054	0.5478
7806	13662	14784	7498	1434	5172

CUADRO 6. Términos de selección de las regresiones del ingreso condicional por cultivo

Cultivo	Papa blanca	Alfalfa	Arroz	Café	Maíz amarillo duro	Maíz amiláceo	Papa nativa	Plátano	Uva	Yuca
Papa blanca	1.22*** (0.261)	-1.08 (0.155)	0.25 (0.163)	-1.08 (0.155)	-1.08*** (0.190)	-0.75*** (0.313)	-0.30 (0.329)	-1.27*** (1.230)	0.50 (0.280)	-0.79** (0.261)
Alfalfa	0.38*** (0.094)	0.3016 (0.255)	1.24*** (0.265)	1.24*** (0.265)	0.77*** (0.115)	-1.13*** (0.145)	0.36* (0.147)	-0.80*** (0.276)	0.25 (0.795)	-0.25 (0.215)
Arroz	-2.08*** (0.204)	-1.69*** (0.248)	-0.31* (0.135)	-0.31* (0.135)	-0.37** (0.113)	0.67* (0.339)	-0.09 (2.199)	-0.23 (0.174)	0.30 (0.594)	-0.13 (0.180)
Café	-0.23** (0.079)	-0.11 (0.247)	0.52** (0.159)	0.52** (0.159)	0.20** (0.071)	-0.46*** (0.093)	0.30 (0.250)	0.002 (0.108)	-1.03 (2.816)	0.26* (0.113)
Maíz amarillo duro	-0.74* (0.355)	0.23 (0.357)	1.74*** (0.306)	0.11 (0.161)	1.74*** (0.126)	1.74** (0.603)	-0.70 (0.885)	-0.94** (0.307)	0.31 (0.844)	-0.35 (0.337)
Maíz amiláceo	0.22 (0.130)	-0.29* (0.137)	0.02 (0.266)	0.36 (0.214)	0.31* (0.126)	0.004 (0.115)	0.004 (0.115)	2.52*** (0.426)	0.12 (0.709)	2.37*** (0.323)
Papa nativa	0.49*** (0.072)	0.52*** (0.149)	-2.92** (1.001)	-1.22*** (0.303)	-0.13 (0.205)	0.11 (0.124)	0.11 (0.124)	0.75 (0.751)	-1.04 (3.376)	-1.39* (0.630)
Plátano	1.96*** (0.290)	0.46 (0.595)	0.76** (0.251)	2.13*** (0.190)	-0.02 (0.220)	2.10*** (0.505)	4.45** (1.501)	1.07 (1.420)	1.07 (1.420)	-0.59* (0.259)
Uva	0.01 (0.220)	0.31 (0.159)	1.28*** (0.173)	-2.26*** (0.546)	0.68*** (0.122)	-0.09 (0.388)	-2.09 (1.199)	1.30*** (0.331)	1.30*** (0.331)	0.68* (0.319)
Yuca	0.03 (0.310)	-0.20 (0.521)	-0.56 (0.441)	-0.14 (0.286)	-0.44 (0.255)	-2.28*** (0.497)	-2.00 (1.042)	-1.64*** (0.367)	-0.13 (1.058)	-0.13 (1.058)

FUENTE: elaboración propia.

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$. Errores estándar entre paréntesis.

gresos de la papa blanca, la alfalfa, el café, el maíz amarillo duro, el plátano y la yuca. Mientras que la precipitación de invierno incide sobre la alfalfa, el arroz, el café, el maíz amarillo duro, la papa nativa, el plátano y la yuca.

Las variables del término de selección (denominadas λ en el cuadro 5) representan la correlación entre los errores en la selección de cultivo y el ingreso condicional, es decir, muestra la interacción entre los cultivos. En el caso en el que el coeficiente es negativo (positivo) ello sugiere que las características de una unidad productora aumentan la probabilidad de elección de un cultivo y hacen menos (más) atractivos otros cultivos. Por ejemplo, el coeficiente relativo al arroz en la ecuación de ingreso condicional de la papa blanca tiene signo negativo; esto implica que en caso de que la ecuación de selección predice que es más probable que el productor agropecuario elija el cultivo del arroz, pero que en su lugar elija cultivar papa blanca, entonces el productor tendrá menores ingresos que lo esperado al cultivar papa blanca. Lo contrario pasa para el cultivo de la papa nativa, en el que el signo es positivo, y por tanto el agricultor tendrá mayores ingresos a los esperados cultivando papa blanca. El cuadro 6 reproduce los términos de selección por cultivo.

En el cuadro 7 se reportan los efectos marginales de la temperatura y la precipitación.⁹ Los efectos marginales se calcularon considerando los cambios de probabilidad en la selección de los cultivos provenientes de los λ de la ecuación de ingreso condicional. Los cultivos que presentan pérdidas anuales de ingresos condicionales, ante el aumento de 1°C de temperatura, son la alfalfa, el arroz, el café, el maíz amarillo duro, el plátano y la yuca. Los efectos marginales de la precipitación tienden a ser de menor magnitud en valor absoluto que aquellos reportados para temperatura. Los efectos marginales implican que un mayor nivel de precipitación (en milímetros al mes) genera pérdidas para prácticamente todos los cultivos, con excepción de la papa blanca y la yuca (véase cuadro 7).

1. *Simulaciones climáticas*

Las simulaciones realizadas sobre los efectos del cambio climático en la selección de cultivos y sobre el ingreso de los productores se analizan en referencia a un escenario base que asume que prevalecerán las condiciones actuales

⁹ Los efectos marginales, por la especificación utilizada, debe interpretarse como el cambio porcentual en los ingresos ante un aumento de 1°C de temperatura o de un aumento de 1 mm en precipitación mensual.

**CUADRO 7. Efectos marginales anuales de las variables climáticas
sobre el ingreso condicional**

(Cambio porcentual en el ingreso ante un grado de aumento en la temperatura
o un aumento de mm al mes)

	<i>Temperatura</i>	<i>Precipitación</i>
Papa blanca	0.03	0.13
Alfalfa	-0.76	-1.77
Arroz	-15.62	-0.17
Café	-42.31	-0.12
Maíz amarillo duro	-6.83	-0.22
Maíz amiláceo	9.64	-0.56
Papa nativa	17.00	-0.23
Plátano	-4.06	-0.05
Uva	8.85	-1.61
Yuca	-15.40	0.33

FUENTE: cuadro 5.

para los productores, por lo cual la temperatura y la precipitación actuales se mantienen inalteradas.

El cuadro 8 muestra un resumen de los cambios de temperatura y precipitación para los dos modelos respecto al periodo base. La elección del escenario RCP 8.5 para la elaboración de las simulaciones responde a la tendencia actual de las emisiones. Ambos modelos proyectan aumentos promedio similares para la temperatura, así como para la precipitación. Siendo más extremo, en términos de temperatura, el modelo ACCESS, mientras que el modelo CNRM-CM5 muestra un aumento más acentuado en los niveles de precipitación para el verano. La temperatura y precipitación promedio anuales para el modelo CNRM-CM5 se muestra en el mapa 2.

Los parámetros estimados mediante el modelo logit multinomial permiten simular los cambios en la probabilidad de elección de los cultivos frente

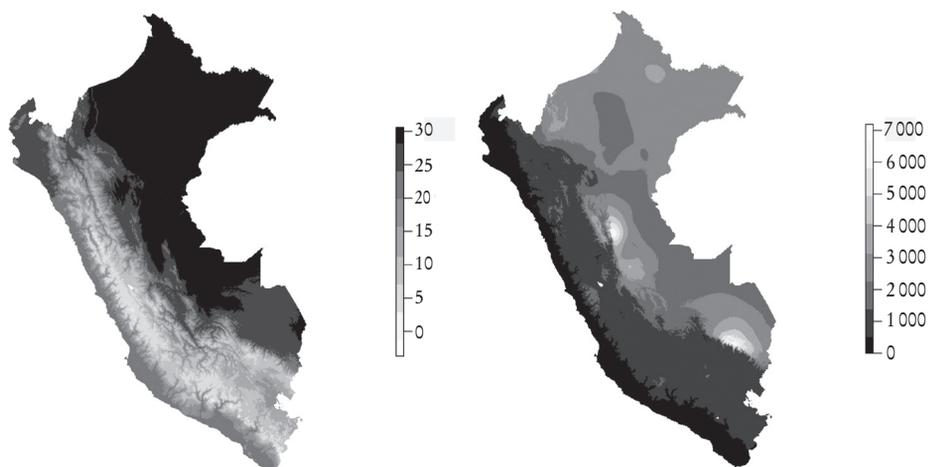
CUADRO 8. Variables climáticas (2070)

(Anomalía promedio respecto a 1950-2000)

	<i>Modelo</i>			
	<i>ACCESS</i>		<i>CNRM-CM5</i>	
	<i>Temperatura</i> °C	<i>Precipitación (porcentaje</i> <i>respecto a la</i> <i>precipitación actual)</i>	<i>Temperatura</i> °C	<i>Precipitación (porcentaje</i> <i>respecto a la</i> <i>precipitación actual)</i>
Verano	3.7	12.9	3.1	18.9
Invierno	4.2	4.0	3.6	3.1

FUENTE: elaboración propia con datos provenientes de la muestra.

MAPA 2*



FUENTE: elaboración propia con datos provenientes de Hijmans *et al.*, disponibles en <http://worldclim.org/>

* Los datos son para el periodo 2070 (promedio del periodo 2061-2080) y son las proyecciones climáticas generadas por el modelo de circulación general ACCESS CNRM-CM5 del Centro Nacional de Investigación Meteorológica y del Centro Europeo de Formación, Investigación y Estudios Avanzados en Computación Científica (Voltaire *et al.*, 2012), para el escenario extremo RCP 8.5 (Representative Concentration Pathways) disponible en la base WorldClim. Las proyecciones corresponden a las más recientes proyecciones climáticas que se utilizan en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC. La salida del modelo CNRM-CM5 fue sujeto a un downscaling y calibrado (corrección de sesgo) utilizando WorldClim 1.4 como clima actual de referencia. Los datos de temperatura promedio por temporada se obtuvieron de promediar la temperatura máxima promedio y la temperatura mínima promedio.

a los cambios en la temperatura y la precipitación. El cuadro 9 reporta la probabilidad de elección promedio para los dos escenarios climáticos y la diferencia respecto al escenario actual. Los resultados de las simulaciones con ambos modelos son similares y muestran que el cambio climático afectaría negativamente la elección de ambas especies de papas, la alfalfa, el arroz, el café, la uva y la yuca, a favor de ambas especies de maíz y el cultivo del plátano. Las simulaciones realizadas con el modelo ACCESS muestran que los cultivos que presentan una caída importante son ambas especies de papa y el café, y las especies de maíz consideradas tienen un importante aumento en su probabilidad de elección. Por otro lado, con el modelo CNRM-CM5, la papa nativa, la alfalfa y el café muestran caídas importantes en sus probabilidades de elección y nuevamente las especies de maíz consideradas exhiben aumentos considerables.

El ingreso condicional ante los escenarios alternativos se muestra en el

CUADRO 9. Probabilidad de elección promedio de cultivos ante cambios en el clima

	<i>Clima actual</i>	<i>ACCESS</i>		<i>CNRM-CM5</i>	
	<i>Probabilidad de elección</i>	<i>Probabilidad de elección</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Probabilidad de elección</i>	<i>Diferencia</i>
Papa blanca	24.4	17.6	-6.8***	21.0	-3.4***
Alfalfa	10.5	6.9	-3.6***	6.3	-4.2***
Arroz cáscara	3.8	2.6	-1.3***	3.4	-0.5***
Café	15.5	9.5	-6.1***	11.3	-4.2***
Maíz amarillo duro	7.1	19.5	12.4***	15.7	8.6***
Maíz amiláceo	12.4	25.8	13.4***	25.2	12.8***
Papa nativa	13.5	6.9	-6.5***	5.9	-7.6***
Plátano	6.8	8.9	2.1***	8.6	1.8***
Uva	1.3	0.2	-1.1***	0.3	-1.0***
Yuca	4.7	2.1	-2.6***	2.4	-.3***

FUENTE: elaboración propia.

***p < 0.001, **p < 0.01, *p < 0.05.

cuadro 10.¹⁰ Los resultados de ambos escenarios climáticos son consistentes, y muestran una reducción de los ingresos condicionales para la alfalfa, el arroz, el café y el maíz amarillo duro y aumentos para ambas especies de papa, el maíz amiláceo, el plátano y la uva. Solamente difieren en los resultados para la yuca, donde el modelo ACCESS revela pérdidas y el modelo CNRM-CM5 muestra ganancias.

CUADRO 10. Ingreso condicional ante cambios en el clima

	<i>Clima actual</i>	<i>ACCESS</i>		<i>CNRM-CM5</i>	
	<i>Ingreso condicional (miles de soles por hectárea)</i>	<i>Ingreso condicional (miles de soles por hectárea)</i>	<i>Diferencia (porcentaje)</i>	<i>Ingreso condicional (miles de soles por hectárea)</i>	<i>Diferencia (porcentaje)</i>
Papa blanca	8.0	8.1	1.0	8.1	0.9
Alfalfa	6.0	5.7	-4.4	5.6	-5.5
Arroz cáscara	6.9	3.4	-51.0	4.5	-34.8
Café	4.7	1.3	-72.2	1.7	-65.1
Maíz amarillo duro	3.2	2.3	-29.0	2.5	-21.6
Maíz amiláceo	2.9	4.2	46.9	3.9	34.1
Papa nativa	11.2	25.3	126.7	31.0	177.0
Plátano	5.7	3.9	-32.6	4.6	-19.4
Uva	24.6	32.5	32.2	30.5	23.9
Yuca	7.0	3.7	-46.9	4.1	-40.8

FUENTE: elaboración propia.

¹⁰ El valor reportado corresponde a la mediana de la muestra.

CUADRO 11. *Ingreso condicional esperado ante cambios en el clima*

	<i>Miles de soles por hectárea</i>	<i>Diferencia respecto al ingreso esperado actual (porcentaje)</i>
Ingreso esperado actual	6.7	—
ACCESS 2070	5.8	-13
CNRM-CM5 2070	6.2	-8

FUENTE: elaboración propia.

Los cultivos que muestran mayores pérdidas son el arroz, el café y la yuca, mientras que la papa nativa es el cultivo que exhibe la mayor ganancia.

La información de los cuadros 9 y 10 permite entonces la estimación del ingreso esperado mediano bajo los nuevos escenarios climáticos. El ingreso esperado mediano actual es de 6 700 soles por hectárea. El cambio climático tiene un impacto negativo sobre el ingreso esperado, las simulaciones realizadas con el modelo ACCESS muestran que bajo las condiciones climáticas proyectadas para el 2070 el ingreso esperado se reduciría 13%, mientras que con el modelo CNRM-CM5, el ingreso esperado se reduciría 8%.

CONCLUSIONES

En este artículo se desarrolla un modelo estructural ricardiano para identificar las elecciones endógenas de cultivos, ante modificaciones del clima, que realizan los productores agropecuarios y para estimar el ingreso esperado. El modelo se aplica a 110 227 productores agropecuarios con datos provenientes principalmente del CNA 2012 que ofrece información sobre las prácticas agropecuarias y las características de los hogares. Los resultados obtenidos muestran que la selección de los 10 principales cultivos en el Perú es afectada por el clima. El modelo de selección de cultivos indica que, ante las condiciones climáticas proyectadas para 2070, decrece la probabilidad de elección de ambas especies de papa, la alfalfa, el arroz, el café, la uva y la yuca, a favor de ambas especies de maíz y del plátano.

El análisis del ingreso condicional ante los escenarios alternativos muestra una reducción de los ingresos condicionales para la alfalfa, el arroz, el café y el maíz amarillo duro y aumentos para ambas especies de papa, el maíz amiláceo, el plátano y la uva para ambos modelos climáticos, con resultados mixtos para la yuca, siendo el arroz y el café los que perciben las mayores pérdidas; mientras que la papa nativa es el cultivo que exhibe la mayor ga-

nancia. Ante los escenarios climáticos, considerados a 2070, se proyecta una caída de ingreso condicional esperado de los productores, siendo el modelo ACCESS, cuyo aumento de temperatura es mayor, el más desfavorable. Se estima que la caída de los ingresos condicionales esperados sea de entre 8 y 13%, dependiendo del modelo climático aplicado.

El estudio muestra que los productores agropecuarios serán capaces de adaptarse a partir de cambios en su elección de cultivos y anticipa la forma en que cambiarán los patrones de cultivos ante las nuevas condiciones climáticas. En particular, se muestra que la elección del cultivo de maíz aumenta, ya que éste se encuentra en una variedad de zonas climáticas (Seo y Mendelsohn, 2008b; Kurukulasuriya y Mendelsohn, 2008), así como que la probabilidad de elección del cultivo de plátano también aumenta ante los incrementos de temperatura y precipitación.

Sin embargo, el modelo no considera una combinación de cultivos o la inclusión de nuevas especies; ello implica una subestimación de los sustitutos disponibles en el futuro. Es importante considerar que el análisis no incorpora el efecto de los precios, lo que claramente afecta la elección de los cultivos; ni el potencial efecto fertilización derivado del aumento de las emisiones de CO₂ lo que afectaría los rendimientos de los cultivos. Otro factor importante no considerado es el monto de tierra de cultivo, que es otra variable de elección de los agricultores. Asimismo, se asume que no existen barreras a la adaptación (Seo y Mendelsohn, 2008b; Seo, McCarl y Mendelsohn, 2010).

No obstante ello, el modelo estructural ricardiano estimado para Perú permite conocer la respuesta de los agricultores ante el cambio en la temperatura y los niveles de precipitación. Ello permite elaborar planes de política que contribuyan a ajustar más flexiblemente los cultivos en las unidades agropecuarias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bi, D., M. Dix, S. Marsland, S. Farrell, H. Rashid, P. Uotila, A. Hirst, E. Kowalczyk, M. Golebiewski, A. Sullivan, H. Yan, N. Hannah, C. Franklin, Z. Sun, P. Vohralik, I. Watterson, X. Zhou, R. Fiedler, M. Collier, Y. Ma, J. Noonan, L. Stevens, P. Uhe, H. Zhu, S. Griffies, R. Hill, C. Harris y K. Puri (2013), "The ACCESS Coupled Model: Description, Control Climate and Evaluation", *Australian Meteorological Oceanographic Journal*, vol. 63, núm. 1, pp. 41-64.

- BID, Banco Interamericano de Desarrollo y Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL (2014), “La economía del cambio climático en el Perú” (LC/W.640). CEPAL (2014), *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: Paradojas y desafíos del desarrollo sostenible*, CEPAL, Santiago de Chile.
- Cline, W. R. (2007), *Global warming and agriculture: impact estimates by country*, Peterson Institute, Washington, D. C.
- Dinar, A., y R. Mendelsohn (eds.) (2012), *Handbook on Climate Change and Agriculture*, Edward Elgar Pub, febrero.
- Dubin, J. A., y D. L. McFadden (1984), “An Econometric Analysis of Residential Electric Appliance Holdings and Consumption”, *Econometrica*, vol. 52, núm. 2, pp. 345-362.
- Fischer, G., F. O. Nachtergaele, S. Prieler, E. Teixeira, G. Tóth, H. van Velthuisen, L. Verelst y D. Wiberg (2008), “Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008)”, IIASA/FAO, Luxemburgo/Austria/Roma/Italia.
- Galindo, L. M., J. Samaniego, J. E. Alatorre, J. Ferrer y O. Reyes y L. Sánchez (2014), *Cambio climático, agricultura y pobreza en América Latina*, Estudios del cambio climático en América Latina (LC/W.620), Santiago de Chile.
- Greene, W. H. (2002), *Econometric Analysis*, Prentice Hall, Nueva Jersey.
- Heckman, J. J. (1979), “Sample Selection Bias as a Specification Error”, *Econometrica*, vol. 47, núm. 1, pp. 153-162.
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones y A. Jarvis (2005), “Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas”, *International Journal of Climatology*, vol. 25, núm. 15, pp. 1965-1978.
- Hoffmann, R., y A. L. Kassouf (2005), “Deriving Conditional and Unconditional Marginal Effects in Log Earnings Equations Estimated by Heckman’s Procedure”, *Applied Economics*, vol. 37, núm. 11, pp. 1303-1311.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014), “Summary for Policymakers”, en C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea y L. L. White (eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido/Nueva York, pp. 1-32.
- (2013), “Summary for Policymakers”, en T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. M. B. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P. M. Midgley (eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido/ Nueva York, pp. 1-27.
- (2007), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working*

- Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, editado por M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden y C. E. Hanson, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Kurukulasuriya, P., R. Mendelsohn, R. Hassan, J. K. A. Benhin, T. Deressa, M. Diop, H. M. Eid, K. Y. Fosu, G. Gbetibouo, S. Jain, A. Mahamadou, R. Mano, J. Kabubo-Mariara, S. El-Marsafawy, E. Molua, S. Ouda, M. Ouedraogo, I. Séne, D. Maddison, S. N. Seo y A. Dinar (2006), "Will African Agriculture Survive Climate Change?", *The World Bank Economic Review*, vol. 20, núm. 3, pp. 367-388.
- , y R. Mendelsohn (2008), "Crop Switching as a Strategy for Adapting to Climate Change", *African Journal of Agricultural and Resource Economics*, vol. 2, núm. 1, pp. 105-125.
- Lumley, T. (2010), *Complex Surveys: A Guide to Analysis Using R*, John Wiley & Sons, Hoboken, Nueva Jersey.
- Mendelsohn, R., y A. Dinar (2009), *Climate Change and Agriculture: An Economic Analysis of Global Impacts, Adaptation and Distributional Effects*, Edward Elgar Publishing, Inglaterra.
- , A. Dinar y A. Sanghi (2001), "The Effect of Development on the Climate Sensitivity of Agriculture", *Environment and Development Economics*, vol. 6, núm. 1, pp. 85-101.
- , W. D. Nordhaus y D. Shaw (1994), "The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis", *The American Economic Review*, vol. 84, núm. 4, pp. 753-771.
- Reilly, J. W. Baethgen, F. E. Chege, S. C. van de Geijn, L. Erda, A. Iglesias, G. Kenny, D. Patterson, J. Rogasik, R. Rötter, C. Rosenzweig, W. Sombroek, J. Westbrook, D. Bachelet, M. Brklacich, U. Dämmgen, M. Howden, R. J. V. Joyce, P. D. Lingren, D. Schimmelpfennig, U. Singh, O. Sirotenko y E. Wheaton (1996), "Agriculture in a Changing Climate: Impacts and Adaptation", en R. T. Watson, M. C. Zinyowera y R. H. Moss (eds.), *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses: Contribution of Working Group II to the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido/Nueva York, pp. 427-467.
- Salvo, M. de, D. Begalli y G. Signorello (2014), "Ricardian Analysis Twenty Years After the Original Model: Evolution, Unresolved Issues and Empirical Problems", *Journal of Development and Agricultural Economics*, vol. 6, núm. 3, pp. 124-131.
- Seo, N., y R. Mendelsohn (2008a), "Measuring Impacts and Adaptations to Climate Change: a Structural Ricardian Model of African Livestock Management-Super-1", *Agricultural Economics*, vol. 38, núm. 2, pp. 151-165.
- , y R. Mendelsohn (2008b), "An Analysis of Crop Choice: Adapting to Climate Change in South American Farms", *Ecological Economics*, vol. 67, núm. 1, pp. 109-116.
- , y R. Mendelsohn (2008c), "Animal Husbandry in Africa: Climate Change Impacts and Adaptations", *African Journal of Agricultural and Resource Economics*, vol. 2, núm. 1.

- Seo, S. Niggol (2010), "Is an Integrated Farm more Resilient Against Climate Change? A Micro-Econometric Analysis of Portfolio Diversification in African Agriculture", *Food Policy*, vol. 35, núm. 1, pp. 32-40.
- , B. A. McCarl y R. Mendelsohn (2010), "From Beef Cattle to Sheep Under Global Warming? An Analysis of Adaptation by Livestock Species Choice in South America", *Ecological Economics*, vol. 69, núm. 12, pp. 2486-2494.
- Stern, N. (2008), "The Economics of Climate Change", *American Economic Review*, vol. 98, núm. 2, pp. 1-37.
- Train, K. E. (2009), *Discrete Choice Methods with Simulation*, Cambridge University Press, Nueva York.
- Voldoire, A., E. Sánchez-Gómez, D. Salas y Mélia, B. Decharme, C. Cassou, S. Sénési, S. Valcke, I. Beau, A. Alias, M. Chevallier, M. Déque, J. Deshayes, H. Douville, E. Fernández, G. Madec, E. Maisonnave, M.-P. Moine, S. Planton, D. Saint-Martin, S. Szopa, S. Tyteca, R. Alkama, S. Belamari, A. Braun, L. Coquart y F. Chauvin (2012), "The CNRM-CM5.1 Global Climate Model: Description and Basic Evaluation", *Climate Dynamics*, vol. 40, núms. 9-10, pp. 2091-2121.