

PRODUCCIÓN MECANIZADA DE MAÍZ, CAMOTE Y YUCA EN LA COSTA DESÉRTICA PERUANA: ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO Y PROPUESTAS DE MITIGACIÓN

MECHANIZED PRODUCTION OF MAIZE, SWEET POTATO AND CASSAVA IN THE PERUVIAN DESERT COAST: ESTIMATION OF THE CARBON FOOTPRINT AND MITIGATION PROPOSALS

Rodrigo A. Morales A¹, Percy Zorogastúa C.², Felipe de Mendiburu³ y Roberto Quiroz⁴

Resumen

El objetivo del estudio fue estimar la huella de carbono (HC) en la producción mecanizada de maíz, camote y yuca, así como identificar y proponer opciones de mitigación en la costa del Perú. Se realizó una encuesta a 100 productores de Barranca y Cañete en la región de Lima. Se registraron todas las prácticas de producción y protección de cultivos. La estimación se llevó a cabo con el modelo de simulación programado en Excel; Cool Farm Tool (CFT). El maíz en Barranca registró la mayor cantidad de labranza y aplicaciones de pesticidas. En ambos lugares, se aplicaron dosis medias a altas de N al maíz, mientras que el camote y yuca sólo recibieron dosis altas. Cuando las emisiones de CO₂ por transporte fueron incluidas en los análisis, las fincas que cultivaban yuca en Barranca generaron 267 kg CO₂eq·t⁻¹, que fue la mayor HC (132 kg CO₂eq·t⁻¹ adicionales). Esta adición fue similar en todos los cultivos. Las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) para los tres cultivos fueron la aplicación (49%) y la producción (38%) de fertilizantes, seguida del uso de plaguicidas (13%). Las opciones de mitigación simuladas con el CCAFS-Mitigation Options Tools (CCAFS-MOT) incluyeron el uso de labranza mínima, la incorporación de residuos agrícolas, el uso de fertilizantes orgánicos procesados e inhibidores de nitrificación. Al incorporar las cuatro opciones de mitigación se estimaron reducciones de GEI en 42%, 22% y 26% para el maíz, camote y la yuca, respectivamente.

Palabras clave: CO₂, CH₄, N₂O, gasto energético, fertilizantes, pesticidas, Barranca, Cañete.

Abstract

The objective of the study was to estimate the carbon footprint (CFP) in the mechanized production of maize, sweet potato and cassava, and to identify and propose mitigation options in the coast of Peru. A survey was conducted in 100 producers from Barranca and Cañete in the Lima region. All production and crop protection practices were registered. The estimation was then conducted with the Excel-based in simulation model; Cool Farm Tool (CFT). Maize in Barranca registered the highest quantity of tillage and applications of pesticides. In both locations, middle to high doses of N were applied to maize whereas sweet potato and cassava received only high doses. When CO₂ emissions due to transportation were included in the analyses, farms cultivating cassava in Barranca generated the largest CFP of 267 kg CO₂eq·t⁻¹ (adding 132 kg CO₂eq·t⁻¹). This addition was similar for all crops. The main sources of greenhouse gases emission (GHE) for all three crops were application (49%), and production (38%) of fertilizers, followed by the use of pesticides (13%). Mitigation options simulated with the CCAFS-MOT included the use of minimum tillage, incorporation of agricultural residues, use of processed organic fertilizers and nitrification inhibitors. By incorporating the four mitigation options GHG reductions in 42%, 22% and 26% were estimated for maize, sweet potato and cassava, respectively.

Key words: CO₂, CH₄, N₂O, energy costs, fertilizers, pesticides, Barranca, Cañete.

Introducción.

Los cultivos de maíz (*Zea mays* L.), camote [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] y yuca (*Manihot esculenta*, Crantz), están considerados entre los cultivos tropicales más consumidos a nivel mundial (Montaldo, 1991; Bolaños, 1997; FAO, 2015). En Perú,

el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI, 2015), reportó que el maíz es el segundo cultivo más sembrado con 326 532 ha, con tendencia al incremento en el tiempo. La yuca es el séptimo cultivo de mayor área de siembra con 123 197 ha y el camote registró siembras de 15 704 ha (MINAGRI, 2015).

Las tendencias actuales de intensificación y comercialización, adoptadas por los agricultores y empresarios, han incrementado el uso de combustibles fósiles (Haverkort & Hillier, 2011). El alto uso de agroquímicos incrementa los rendimientos y la contaminación ambiental a través de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI); conocido como la huella de carbono (HC) (Colomb *et al.*, 2012). Para el IPCC (2013), entre los principales GEI están el CH₄, N₂O y el CO₂, que constituyen importantes factores de cambio climático (CC). También estandarizó la unidad equivalente de CO₂ (CO₂eq), considerando todas las emisiones por su potencial de calentamiento global. Las emisiones se estiman en GEI total emitidas (HC_{ha}) en kgCO₂eq·ha⁻¹ y la intensidad (HC_i) en kg CO₂eq·t⁻¹ (Lal, 2004). El *World Resources Institute* (2014), informó que las emisiones del sector agropecuario del mundo, en 2013, fueron de 5 038.69 Mt CO₂eq, de las cuales en Perú fueron de 23.28 Mt CO₂eq (de éstas el 14.71% son del sector agropecuario). El SEEG Perú (acrónimo del español - Sistema de Estimación de Emisiones de Gases Efecto Invernadero, 2014), indicó que las emisiones de GEI, en el sector agrícola nacional, entre 2000 y 2013, -generado por la fermentación entérica, manejo del estiércol, cultivo de arroz, quema de pastizales y residuos agrícolas y uso de suelos agrícolas- variaron de 23 614 a 27 006 Gg CO₂eq (incremento del 12.56%). De éstos, el 16% corresponde a cultivos, 74.1% a la ganadería y 9.9% a otras actividades agrícolas.

La estimación de la HC en la agricultura es importante para analizar su contribución potencial al CC (Haverkort & Hillier, 2011). Para su cuantificación se utilizan modelos basados en procesos empíricos de las mediciones directas del manejo de la tierra; así como inventarios nacionales realizados por organismos especializados (Olander, 2011). Sin embargo, están limitados por la disponibilidad de datos de pequeña escala y las estimaciones difieren con las mediciones locales (Richards *et al.*, 2016). Frohmann & Olmos (2005), alertaron que la ausencia de estimaciones de HC son barreras ambientales en las exportaciones hacia los mercados de los países industrializados. Anunciaron la implementación del etiquetado en los productos exportados con información de las emisiones de CO₂ en el proceso de producción y transporte. Se han desarrollado herramientas para calcular la HC por efecto de las prácticas agrícolas y forestales (Haverkort & Hillier, 2011; Colomb *et al.*, 2012). De éstas, el modelo matemático Cool Farm Tool v.2 – beta 3 (CFT) -programado en el Excel- es fácil de utilizar y está disponible en forma gratuita en <https://www.coolfarmtool.org/CftExcel>. Este modelo adopta procesos de armonización de datos, calibración y validación (más de 1 000 mediciones de emisiones en campos agrícolas), requeridos por los estándares internacionales (Audsley *et al.*, 2009). Su principal limitante es que no dispone de opciones de mitigación.

El modelo CCAFS-Mitigation Options Tools (CCAFS-MOT), modela la reducción de HC por el uso de medidas de mitigación (Smith *et al.*, 2007; Feliciano *et al.*, 2015). Por todo lo expuesto los objetivos planteados en este estudio fueron: 1) estimar la huella de carbono en la producción mecanizada de maíz, camote y yuca, y 2) identificar y proponer opciones de mitigación en la costa del Perú.

Materiales y métodos.

Encuestas a productores de Barranca y Cañete.

Durante el periodo noviembre de 2015 a enero de 2016, se realizaron 100 encuestas a productores de maíz (36), camote (30) y yuca (34), con error de la muestra de 9.8% de una población finita (corresponde al error en la estimación del valor que ingresa a los modelos y de la estimación de GEI y las medidas de mitigación) (Cochran, 2000). En la provincia de Barranca se encuestaron a productores de La Campiña de Supe, Arguay, San José de Pativilca y el Centro Poblado Santa Elena Norte y Sur. En Cañete, en Hualcará, Herbay y el Centro Poblado Menor de Unanue. Las entrevistas se usaron para generar los insumos para que los modelos estimaran las emisiones de GEI. Por lo tanto; las encuestas consistieron en preguntas específicas para cuantificar las emisiones por las prácticas de producción. Incluyen la preparación de suelos, las aplicaciones de agroquímicos en general, rendimientos comerciales y el transporte de cosechas. La información obtenida se verificó con los técnicos expertos de los tres cultivos y comprobada con la base de datos oficiales del MINAGRI (2015).

Descripción de localidades y variedades sembradas.

Los suelos de las localidades estudiadas, comprenden el Regosol, Leptosol y Fluvisol (Gardi *et al.*, 2014). Debido a la escasa precipitación, se implementaron módulos de riego de 5 000 a 7 000 m³·ha⁻¹, pertenecientes a la junta de usuarios del sub distrito de riego de Cañete y del distrito de Barranca. La ubicación geoespacial de las fincas se realizó con un GPS (latitud de 10° a 13° S y longitud de 76° a 77° W), verificada con Google Earth y se utilizó para calcular las distancias de entrega de la cosecha hasta las empresas agroindustriales y al gran mercado central de Lima. Por localidad se seleccionaron fincas, a las cuales se les realizó el análisis físico-químico de suelos en el laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú. En Barranca los suelos son de textura Franco arenosa, Arena y Arena Limosa y en Cañete, de textura Arena y Franco (Tabla 1). El pH es básico, con bajos contenidos de nitrógeno y materia orgánica. Los registros de la temperatura ambiental máxima y mínima, precipitación pluvial y humedad relativa (periodo 2005-2015), se obtuvieron de las estaciones meteorológicas de la Universidad Nacional Agraria La Molina (Estación Von Humboldt), de Barranca y San Vicente de Cañete; pertenecientes a la red nacional de

Tabla 1. Caracterización de suelos y temperatura promedio anual de las localidades de Barranca y Cañete. Perú.

Localidad	Textura	C Orgánico (%)	N (%)	MO (%)	pH	Densidad Aparente (g·cm ⁻³)	T° promedio anual (°C)
Barranca							
La Campiña	Franco arenoso	0.86	0.08	1.48	7.70	1.46	19.00
Santa Elena Norte	Arena	0.41	0.05	0.70	8.02	1.44	18.80
Santa Elena Sur	Arena	0.23	0.04	0.47	7.85	1.49	18.51
San José Pativilca	Franco arenoso	0.64	0.06	1.04	7.09	1.31	18.51
Arguay	Arena limosa	1.05	1.00	1.81	7.00	1.42	18.51
Cañete							
Hualcará	Arena	0.17	0.03	0.29	7.54	1.50	24.33
Unanue	Arena	0.09	0.03	0.16	7.20	1.49	21.50
Herbay	Franco	1.14	0.08	2.14	7.78	1.42	21.50

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la UNALM. C Orgánico: Carbono Orgánico, MO: Materia Orgánica.

estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

En el cultivo de maíz, los productores siembran los híbridos P30F35, D8008, D5005, D7088, BG-9621 y XB-8010. Los camotes de pulpa naranja sembrados son de las variedades Jonathan, Huambachero INIA y Jewel, los de pulpa morada se siembran las variedades Morado Milagroso y Morado Limeño. En el cultivo de yuca las principales variedades sembradas son Amarilla Criolla y Señorita.

Descripción del modelo de simulación CFT.

Dado que los modelos son, por definición, simples representaciones de los procesos reales, las estimaciones se basan en suposiciones basadas en la ciencia sobre las interacciones dinámicas entre el suelo y su manejo, el clima y otros componentes (Wolf, 2002; Rosenzweig *et al.*, 2013). El modelo CFT está conformado de sub modelos de estimación -p.e. de máxima verosimilitud restringida- de emisiones globales de GEI (CO₂, N₂O y NO por la producción y aplicación de urea y fertilizantes, plaguicidas y labores de labranza). Para ello, el modelo CFT incorporó la siguiente ecuación (Bouwman *et al.*, 2002):

$$\log(N_{emission}) = A + \sum_{i=1}^n Ei$$

Donde $N_{emission}$ es la emisión de N₂O y NO, expresado en kg·ha⁻¹ de N, durante el período de las medidas, A es una constante y Ei es el valor para el factor de efecto i . Los factores de control (factor i), para las emisiones de N₂O y NO de los campos agrícolas, por sistemas de producción, fueron la tasa de aplicación de N, pH del suelo, textura del suelo, el clima y el tipo de cultivo.

El modelo CFT, integra los factores de emisión para la producción de fertilizantes en Europa y del promedio mundial para la producción de fertilizantes, complementadas con información de la energía utilizada para extraer la materia prima, así como las emisiones asociadas con el transporte de la materia prima a la planta de procesamiento (FAO-IFA, 2004; IFA, 2009; Zhang *et al.*, 2013). Considera las emisiones

de las prácticas agronómicas, protección de cultivos, el uso directo de energía para las labores agrícolas y el transporte de productos de cosechas de cultivos y de la actividad ganadera (Ogle *et al.*, 2005; ASABE, 2006; Audsley *et al.*, 2009). Para la estimación de las emisiones de GEI por la incorporación de residuos, CFT utiliza la siguiente ecuación (IPCC, 2007):

$$N_2O - N_{Ninputs} = F_{CR} \times EF_1$$

Donde F_{CR} es la cantidad de N en residuos de cultivos -en la superficie y dentro del suelo- (kg·N·año⁻¹), y EF_1 es el factor de emisión de N₂O debido a las adiciones de N de los residuos de los cultivos [kg N₂O-N (kg N)⁻¹]. El valor predeterminado para EF_1 es 0.01 con rango de incertidumbre de 0.003 a 0.03 (IPCC, 2007). Para la estimación de las emisiones de CH₄ (g) y N₂O (g), debido a la quema de los residuos de los cultivos, incorpora la ecuación del IPCC (2013): $Emission = A \times EF$. Donde A es la cantidad total de biomasa quemada (kg de materia seca) y EF es el factor de emisión del IPCC (en CH₄ y N₂O/kg de materia seca). Los valores de EF , por defecto, fueron 0.01 (IPCC, 2007).

Richards *et al.* (2016), confirmaron la validez de las estimaciones de HC en cultivos básicos en todas las fincas dependientes de grandes cantidades de insumos, por medio del modelo CFT en zonas desérticas y clima templado. A su vez, sugieren la obtención de meta datos en climas tropicales. Coinciden con Milne *et al.* (2013), los cuales señalaron que para reducir las incertidumbres en la estimación de GEI, se necesitan estudios cuantitativos en diversos tipos y prácticas de manejo de suelos por región climatológica. Para el uso del modelo CFT, se seleccionaron las siguientes hojas de trabajo de las nueve existentes: 1. Información general (país, localidad, año, producto, rendimiento por área, clima y temperatura promedio anual); 2. Manejo de cultivos (cultivo, suelos, producto, nutrientes, cantidad y método de aplicaciones de fertilizantes y el número de aplicaciones de plaguicidas). Cada dosis de ingrediente activo por plaguicida se cuenta como una aplicación, ya sea aplicado solo o en mezclas; 5. Uso de energía en campo (electricidad y combustibles por equipos desde

Tabla 2. Promedio de actividades agronómicas, aplicaciones de fitosanitarios y rendimientos comerciales de fincas de Barranca y Cañete productoras de maíz, camote y yuca, y rendimiento comercial de la costa peruana.

Descripción	Barranca			Cañete		
	Maíz	Camote	Yuca	Maíz	Camote	Yuca
Operaciones de labranza	8	10	8	8	5	8
Aplicaciones de plaguicidas	14	15	10	10	10	10
Siembra	mecanizada*	manual	manual	mecanizada	manual	manual
Cosecha	mecanizada*	manual	manual	manual	manual	manual
Rendimiento (t·ha ⁻¹)	11.5	25	18	10.75	26.25	25.75
Rendimiento de costa (t·ha ⁻¹)**	7.32	17.75	17.69			

* 50% de productores. ** Fuente: MINAGRI (2015). Rendimiento de granos de maíz a 14% humedad y frescos de raíces de almacenamiento de camote y yuca.

la preparación de suelos hasta la cosecha); y 7. Transporte de cosechas. En Perú, las emisiones por el transporte, son asignados a la agroindustria y los compradores. Esto permitió hacer una comparación entre las HC a nivel de fincas. Pero, en muchas ocasiones les corresponde a los productores cubrir el costo de transporte de cosechas. Para el cálculo de la HC total por cultivo y por provincias estudiadas, se procedió a la sumatoria de las emisiones por la producción y aplicación de fertilizantes, por el uso de plaguicidas, el uso energético de cultivos a nivel de fincas y por el transporte de cosechas.

Estimación del potencial de mitigación con el modelo CCAFS-MOT.

El modelo CCAFS-MOT incorporó 16 prácticas de mitigación, las cuales pueden reducir o evitar las emisiones de GEI de tierras agrícolas (Moran *et al.*, 2008; Akiyama *et al.*, 2010; Linquist *et al.*, 2012; Shan & Yan, 2013; van Kessel *et al.*, 2013; Benites & Bot, 2014; Nayak *et al.*, 2015). Para el modelamiento de las prácticas de mitigación, se seleccionaron las hojas de entrada general (con información de región, suelos, cambios en el uso de tierra y zona ecológica), cultivos (tipo de cultivo, rendimientos por unidad agrícola, promedio de región, manejo de suelos, el tipo y cantidad de fertilizantes) y mitigación. Las opciones individuales de prácticas de mitigación modeladas por cultivo fueron consultadas a los agricultores, obteniéndose escenarios potenciales de reducción de las emisiones de GEI.

Resultados y discusión.

Componentes agronómicos, fitosanitarios y rendimientos.

Las provincias de Barranca y Cañete representan al sistema de producción de los cultivos estudiados en las costas central y norte de Perú. En estas zonas se siembra el 48.2% del área total de maíz, 72% de camote y 5% de yuca (MINAGRI, 2015). Los productores de maíz señalaron que se presentan las plagas *Agrotis* spp., [*Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith)], *Heliothis zea* (Boddie), áfidos y la enfermedad mancha de asfalto causada por la interacción *Phyllachora maydis*, *Monographella maydis* y *Coniothyrium phyllachorae*. En Barranca realizan 14 aplicaciones de plaguicidas

para el control. El rendimiento promedio reportado fue de 11.5 t·ha⁻¹, donde el 50% de los productores realizan la siembra y cosecha mecanizada. En las fincas de Barranca y Cañete realizan en promedio ocho operaciones de labranza convencional. Se realizan 10 aplicaciones de plaguicidas y el rendimiento promedio es de 10.75 t·ha⁻¹ (Tabla 2). La cosecha es manual y para el secado de las mazorcas se utiliza la radiación solar. El desgrane se efectúa al 14% de humedad en los granos (verificado por la agroindustria). El peso fresco comercial de camote y yuca son estimados en conjunto con los compradores.

En las plantas de camote se presentan las plagas *Agrotis* spp., *Prodenia* (= *Spodoptera*) *eridania* (Cramer), áfidos y enfermedades bacterianas. En Barranca realizan 10 operaciones de labranza y 15 aplicaciones de plaguicidas; cuyo rendimiento promedio fue de 25 t·ha⁻¹. En Cañete realizan cinco operaciones de labranza, con 10 aplicaciones de plaguicidas y el rendimiento promedio es de 26.25 t·ha⁻¹. Indicaron que el follaje fresco es utilizado para la alimentación de animales de especies menores y ganado vacuno. En el cultivo de yuca en Barranca y Cañete se llevan a cabo ocho labores de labranza y se realizan en promedio 10 aplicaciones de plaguicidas para el control de *Erinnyis ello* (L.), *Tetranychus* sp., *Trialeurodes* spp. y *Oidium* spp. En Barranca los rendimientos de yuca fueron de 18 t·ha⁻¹ y en Cañete de 25.75 t·ha⁻¹. En la Tabla 2, se muestra que los rendimientos reportados en los tres cultivos en los dos sitios, superaron los rendimientos promedios de la costa peruana - periodo 2010 a 2014- de 7.32, 17.75 y 17.69 t·ha⁻¹; respectivamente (MINAGRI, 2015).

Los altos rendimientos pueden atribuirse a las altas densidades de siembra (en maíz hasta 9 plantas·m², en camote hasta 7.4 plantas·m² y en yuca 1 planta·m²), al uso de cultivares con alto potencial de rendimientos adaptados al clima desértico, uso de riego, control de plagas y enfermedades y los niveles de fertilización. Según Pandey & Gardner (1992), los altos rendimientos en maíz es reflejo del uso de híbridos con tolerancia a altas densidades y a las plagas y enfermedades.

Todos los agricultores encuestados aplicaron urea a los tres cultivos (Tabla 3). Otras fuentes variaron con el

Tabla 3. Niveles de N, P y K (kg·ha⁻¹) y fertilizantes aplicados en los cultivos de maíz, camote y yuca en Barranca y Cañete. Perú.

Localidad	Maíz				Camote				Yuca				
	N	P	K	Fertilizantes	N	P	K	Fertilizantes	N	P	K	Fertilizantes	
Barranca	119 a	69 a	33 a	Urea	80 a	60 a	33 a	Urea	174 a	81 a	50 a	Urea	
	345	92	75	NH ₄ NO ₃				NH ₄ NO ₃				(NH ₄) ₂ HPO ₄	(NH ₄) ₂ HPO ₄
				0-46-0				KCl				K ₂ SO ₄	KCl
				(NH ₄) ₂ HPO ₄									
Cañete	105 a	40 a	100 a	Urea	92 a	92	50 a	Urea	92 a	40 a	50 a	Urea	
	200	120	140	0-46-0				0-46-0				(NH ₄) ₂ HPO ₄	(NH ₄) ₂ HPO ₄
				20-20-20				KCl				Ca(H ₂ PO ₄) ₂	KCl
				KCl									

cultivo y el sitio. Los productores de maíz de ambos sitios informaron usar NH₄NO₃, (NH₄)₂HPO₄ y 20-20-20. Los productores de camote en Barranca fertilizaron con NH₄NO₃, (NH₄)₂HPO₄; el KCl y K₂SO₄ como fuentes de K₂O. Mientras que en Cañete aplicaron NH₄NO₃, (NH₄)₂HPO₄, Ca(H₂PO₄)₂ y 0-46-0. Los productores de yuca en Barranca aplicaron (NH₄)₂HPO₄ y 0-46-0. En Cañete, se aplicaron (NH₄)₂HPO₄, 20-20-20 y 0-46-0. En el maíz, en ambos sitios, se aplicaron dosis medias a altas de N; se aplicaron dosis altas de N en el camote y yuca. En maíz, se informó de aplicaciones de dosis medias y altas de P y K, y medias en camote y yuca.

Estimación de las emisiones de GEI en fincas de maíz, camote y yuca.

Emisiones por la producción y aplicación de fertilizantes.

En las fincas de maíz en Barranca, por la producción de fertilizantes, se estimaron altas emisiones promedio de 1 278 kg CO₂eq·ha⁻¹ (Tabla 4). Le siguieron las emisiones en camote de Cañete y de yuca en Barranca con promedios de 963 kg y 712 kg CO₂eq·ha⁻¹; respectivamente. Por la aplicación de fertilizantes, las mayores emisiones se calcularon en Barranca en las fincas de yuca y maíz con promedio de 892 kg CO₂ eq·ha⁻¹ y 574 NO₂ (kg CO₂ eq·ha⁻¹) y de 589 kg CO₂ eq·ha⁻¹ y 403 NO₂ (kg CO₂ eq·ha⁻¹); respectivamente. Se desprende que la producción de los fertilizantes requiere del uso de gran cantidad de combustibles fósiles, es dependiente de las tecnologías de producción

y del país donde se fabrica el fertilizante (Brentrup & Pallière, 2008). Las estadísticas del MINAGRI (2015), registran que el 98% de las importaciones de fertilizantes nitrogenados provienen de Estados Unidos.

La aplicación de estos fertilizantes aumenta las emisiones de N₂O y NO y NH₃, por medio de la nitrificación, desnitrificación y volatilización que se produce naturalmente en los suelos (IPCC, 2013). Las fincas de maíz en Barranca, caracterizadas por las aplicaciones de altos niveles de N (hasta 345 kg) y con los mayores rendimientos, influyeron en la HC_{ha} promedio calculada de 2 578 kg CO₂eq·ha⁻¹. Esta HC_{ha} reflejó el alto y continuo uso de agroquímicos, especialmente la fertilización nitrogenada. La HC_i promedio resultante (224 kg CO₂eq·t⁻¹), es menor al reporte de maíz en La Pampa, Argentina con 300 kg CO₂eq·t⁻¹ (Frank *et al.*, 2014). También son coherentes con las HC obtenidas en campos sembrados con maíz en Canadá por 19 años continuos (Ma *et al.*, 2014). En Perú, la producción nacional de maíz no cubre la demanda de 4 millones de toneladas requeridas por el sector avícola que es el mayor consumidor (FAO, 2015). Por lo tanto, hay programaciones oficiales de aumento del área de siembra concomitante al incremento de altas aplicaciones de N. El maíz es considerado gran extractor de nutrientes del suelo, restituyéndose periódicamente con fertilizantes nitrogenados en su proceso productivo. El sistema de producción de camote y yuca también está basado en

Tabla 4. Emisiones promedio de CO₂ por componente de producción en fincas de maíz, camote y yuca, y las respectivas HC estimadas con el modelo CFT. Perú.

Componente	Barranca			Cañete		
	Maíz	Camote	Yuca	Maíz	Camote	Yuca
Producción de fertilizantes (kg CO ₂ eq·ha ⁻¹)	1 278	517	712	538	963	543
Aplicación de fertilizantes (kg CO ₂ eq·ha ⁻¹)	589	464	892	439	544	473
N ₂ O (kg CO ₂ eq·ha ⁻¹)	403	285	574	184	332	319
Uso de plaguicidas (kg CO ₂ eq·ha ⁻¹)	205	294	205	205	205	205
Uso energía en campo (kg CO ₂ eq·ha ⁻¹)	103	65	55	60	50	59
Sub Total (kg CO ₂ eq·t ⁻¹)	224	65	135	133	80	62
Sub Total (kg CO ₂ eq·ha ⁻¹)	2 578	1 625	2 438	1 426	2 094	1 599
Transporte cosecha (kg CO ₂ eq·ha ⁻¹)	185	3503	2 374	334	2 348	2 287
Total (kg CO ₂ eq·t ⁻¹)	240	205	267	164	169	151
Total (kg CO ₂ eq·ha ⁻¹)	2 763	5 128	4 812	1 760	4 442	3 886

aplicaciones de altos niveles de N. Esta práctica agrícola concuerda con los reportes de la FAO-IFA (2004), al señalar los incrementos en el uso de fertilizantes nitrogenados, en el tiempo, especialmente en los países en vías de desarrollo.

Estimación de la HC por el uso energético de cultivos a nivel de fincas.

Las emisiones de GEI por el uso de plaguicidas fueron similares en los tres cultivos de los dos sitios (promedio de 205 kg CO₂eq·ha⁻¹), a excepción del camote en Barranca con promedio de 294 kg CO₂eq·ha⁻¹, donde se aplica la mayor cantidad de plaguicidas. Se estimó que en las fincas de maíz, camote y yuca de Barranca la energía directa utilizada en las labores agronómicas fue de 1 461, 918 y 779 MJ·ha⁻¹; respectivamente. Chaparro *et al.* (2005), calcularon que el uso energético para la labranza convencional en maíz del Valle de Cauca, Colombia fue de 3 634 MJ·ha⁻¹. El mayor gasto energético en las fincas de maíz en Barranca, se reflejó en la mayor emisión promedio de 103 kg CO₂eq·ha⁻¹.

La menor HC_{ha} se obtuvo en las fincas de maíz en Cañete con promedio de 1 426 kg CO₂eq·ha⁻¹. Por los altos rendimientos de raíces comerciales de yuca en Cañete y camote en Barranca, se estimaron las menores HC_i con promedio de 62 y 65 kg CO₂eq·t⁻¹; respectivamente. Las HC_i obtenidas en la producción de camote coinciden con los reportes de Filipinas que varían de 23 a 95 kg CO₂eq·t⁻¹ (Flores *et al.*, 2016). Como comparador de las HC estimadas en la producción de yuca, en Nigeria se reportaron HC_i de 105 kg CO₂eq·t⁻¹ (World Bank, 2013). En las fincas de yuca en Barranca, la HC_i promedio fue de 135 kg CO₂eq·t⁻¹.

HC totales considerando las emisiones por el transporte de cosechas.

En Barranca las cosechas de maíz son transportadas a granel desde las fincas, en vehículos de motor diésel con cargas superiores a 3.5 toneladas, hasta las granjas avícolas en Huaura, con distancia promedio de 24 km. En Cañete son transportados a Chíncha (distancia promedio de 50 km). Por el transporte de maíz desde Barranca y Cañete las emisiones promedio fueron de 185 y 334 kg CO₂eq·ha⁻¹; respectivamente. El 90% de las cosechas de camote y yuca es transportado al gran mercado mayorista de Lima, cuya distancia promedio desde Barranca es de 199 km y desde Cañete de 166 km. El resto de la cosecha es consumida en los restaurantes locales. Las emisiones de GEI en las fincas de camote y yuca de Barranca, fueron mayores que las de Cañete. En Barranca, también se calcularon las mayores HC totales por cultivo, por el sistema intensivo de producción y por las mayores distancias de transporte de cosechas. El rango de incremento en la HC_i, por el transporte, fue de 16 a 140 kg CO₂eq·t⁻¹ en las fincas de maíz y camote en Barranca; respectivamente. Haverkort & Hillier (2011), indicaron que el transporte incrementó la HC_i en la producción de

papa hasta 12.5 kg CO₂eq·t⁻¹. Flores *et al.* (2016), concluyeron que las HC difieren según el sistema de utilización de recursos energéticos como el fertilizante químico y el diésel.

En los tres cultivos, el aporte respectivo a las HC por la aplicación y producción de fertilizantes fue de 49% y 38%, y por el uso de plaguicidas con 13%. De las emisiones por la aplicación de fertilizantes por sitios, en la producción de yuca en Barranca y Cañete aportó el 61% y 51%; respectivamente. Se confirmó que los fertilizantes en la agricultura son considerados como la fuente antropogénica más importante de emisión de GEI. Además, producen efectos negativos directos en la inocuidad de alimentos, alteran el equilibrio ambiental y con ello, alta contaminación. De las emisiones de GEI del 2013 del sector agropecuario nacional, la HC total calculada en los tres cultivos en el sistema de producción de costa, representó el 1.5% del total de las emisiones. La HC_{ha} de maíz acumuló 0.87%, de camote el 1.85% y de yuca el 1.68%. En las estadísticas nacionales oficiales no hay reportes de las HC de estos tres cultivos; por lo tanto, este estudio adquiere gran importancia. Por lo tanto; se confirmó que el cálculo de la HC por sistema de cultivo es un aporte valioso para una política eficiente y gestión de la sustentabilidad para afrontar el CC.

Evaluación del impacto potencial de las prácticas de mitigación.

Con el CCAFS-MOT se modelaron diversas opciones de mitigación en la producción de maíz, camote y yuca con el sistema de producción mecanizado, sin afectar la capacidad de producción, con reducción energética proveniente de los combustibles fósiles y, por consiguiente, reducción del impacto ambiental y la conservación de los recursos energéticos no renovables (IPCC, 2007; Andrade *et al.*, 2008; IFA, 2009; Olivet *et al.*, 2012; Herrero *et al.*, 2013). Las prácticas de mitigación modeladas fueron consultadas con los productores para determinar la factibilidad práctica de su implementación con la finalidad de transformar una posible amenaza en una oportunidad (Tabla 5). Los escenarios de producción que se conformaron por cultivo, con las mejores propuestas de mitigación, fueron; i) incorporación de residuos agrícolas para mejorar la fertilidad de suelos (utilizada solo en algunas unidades productivas de Barranca), ii) la aplicación de abonos orgánicos procesados. Posee un nivel de aplicabilidad media. Implica bajos costos adicionales ya que su valor es bajo y es transportado en los mismos vehículos que transporta las cosechas. Técnicamente se debe contemplar que los suelos con alta humedad se tornan en emisores de CH₄ y con poca humedad en sumideros (Nyakatawa *et al.*, 2011), iii) la labranza mínima que consiste en un solo pase de rastra semi pesada para la preparación de terreno, y iv) uso de inhibidores de nitrificación, los cuales evitan que el NH₄ se transforme en NO₂ y finalmente en NO₃ (Akiyama *et al.*, 2010). Se

Tabla 5. Opciones de estrategias de mitigación de HC en la producción mecanizada de maíz, camote y yuca. Barranca y Cañete. Perú.

Cultivo	Prácticas de mitigación (reducción promedio kg CO ₂ eq·ha ⁻¹)				
	HC _{ha} de referencia (kg CO ₂ eq·ha ⁻¹)	Inhibidor nitrificación	Labranza mínima	Abono orgánico	Incorporación residuos
Maíz	1 921	43	138	258	362
Camote	1 802	48	122	226	
Yuca	1 961	104	150	255	

estimó que su uso posee un bajo potencial de reducción de la HC (3.4%).

Las opciones individuales de mitigación modeladas y seleccionadas varían en la capacidad de reducir las HC por cultivo. Así, por la implementación de la labranza mínima en los sistemas de producción de los tres cultivos, se reflejó una reducción promedio de la HC en 7% (7.2% en maíz, 6.8% en camote y 7.6% en yuca). Con esta práctica -coincidiendo con la literatura especializada- se ha logrado reducciones en: la compactación del suelo, riesgo de erosión, gasto energético y reducciones de hasta 19% en los costos de preparación de terreno; lo que conlleva ingresos adicionales (Benites & Bot, 2014; Marquina *et al.*, 2015). Con la incorporación de residuos de plantas de maíz, se reduce la HC en promedio 19% y al implementar todas las opciones de mitigación seleccionadas, la HC se reduce en 42%. Para la implementación significativa de las medidas de mitigación por parte de los productores, es estratégico que las autoridades estatales del sector agrícola ejecuten las siguientes acciones: i) capacitaciones técnicas en CC, enfocadas a que la adopción de prácticas de mitigación amigables con el ambiente, se refleja en la sustentabilidad de los sistemas de producción; ii) disponer de instrumentos comerciales que promuevan una agricultura basada en bajas emisiones de GEI y que se refleje en incentivos por la conservación del ambiente y una mejor aceptación de productos alimenticios por parte de los consumidores; iii) disponer de inversiones, políticas y apoyo económico específico para los productores dispuestos a implementar medidas de mitigación.

Conclusiones.

Se comprobó que el sistema mecanizado de maíz, camote y yuca en la costa peruana son totalmente dependientes de fertilizantes sintéticos y de plaguicidas. Al cuantificar las HC en los tres cultivos a nivel de fincas por sitios, se obtuvo la menor HC_i en la producción de yuca en Cañete con promedio de 62 kg CO₂eq·t⁻¹, dos veces menor a la HC_i promedio de Barranca. La HC obtenida en maíz de Barranca superó hasta 1.7 veces a la estimada en Cañete. Las fincas de maíz y yuca en Barranca son consideradas altas emisores de GEI. Al considerar el transporte de cosechas, la menor y mayor HC total se obtuvo en las fincas de yuca en Cañete y Barranca. En los tres cultivos, las emisiones conjuntas por la producción y

aplicación de fertilizantes aportan en promedio el 87% a la HC total y el resto por el uso de plaguicidas. En términos de país, la HC calculada en conjunto para maíz, camote y yuca representó el 1.47% del total de las emisiones del sector agropecuario. Se estimó el potencial de reducción de la HC por cultivo, por la modelación de las siguientes opciones de mitigación: labranza mínima, incorporación de residuos agrícolas, uso de abonos orgánicos procesados e inhibidores de nitrificación. Al incorporar estas cuatro opciones de mitigación se estimó reducciones promedio de GEI de hasta 42% en la producción mecanizada de maíz. Con su implementación se conforman escenarios sustentables, por cultivo, los cuales requieren de su evaluación en campo integrando el uso de la tierra y clima.

El modelo CFT se constituye en una herramienta útil y de fácil aplicación para la estimación de la HC en condiciones de finca, que pueden ser utilizadas por agricultores, extensionistas y tomadores de decisión.

Agradecimientos.

Agradecemos a los Programas del CGIAR sobre Raíces, Tubérculos y Bananos (RTB), *Humid Tropics*, *Climate Change, Agriculture and Food Security* (CCFAS). El autor principal agradece el apoyo brindado por la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología de Panamá (SENACYT) y del Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP).

Literatura citada.

- Akiyama H., Xiaoyuan Y. & Yagi Y. 2010. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. *Global Change Biology*. 16: 1837–1846.
- Andrade H., Brook R. & Ibrahim, M. 2008. Growth production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. *Plant and Soil* 308(1-2): 11-22.
- ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers). 2006. Agricultural machinery management data. American Society of Agricultural and Biological Engineers Standard ASAE EP496.3. ASABE, St. Joseph. 385–398.
- Audsley E., Stacey K., Parsons D.J. & Williams A.G. 2009. Estimation of the greenhouse gas emissions from agricultural pesticide manufacture and use. Cranfield University. 20 p.
- Benites J.R. & Bot A. 2014. Agricultura de Conservación, una práctica innovadora con beneficios económicos y

- medioambientales. Editorial Banco Agropecuario. Lima, Perú. 344 p.
- Bolaños J. 1997. Un Modelo Simplificado de la Productividad Potencial del Maíz. *En*: Bolaños J. (ed) Síntesis de resultados experimentales del Programa Regional de Maíz (1993-1995): 291-296. CIMMYT – PRM. Guatemala.
- Bouwman A.F., Boumans L.J.M. & Batjes N.H. 2002. Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields. *Global Biogeochem Cycles*. 16(4), 1080, doi:10.1029/2001GB001812
- Brentrup F. & Pallière C. 2008. GHG emissions and energy efficiency in European nitrogen fertiliser production and use. York: The International Fertiliser Society. 639 p.
- Cochran W.G. 2000. Técnicas de Muestreo, décima quinta edición. Compañía Editorial Continental S.A. México DF. 513 p.
- Colomb V., Bernoux M., Bockel L., Chotte J-L., Martin S., Martin-Phipps C., Mousset J., Tinlot M. & Touchemoulin O. 2012. Review of GHG Calculators in Agriculture and Forestry Sectors: A Guideline for Appropriate Choice and Use of Landscape Based Tools, Version 2.0 (ADEME, IRD, FAO). 43 p.
- Chaparro A., Herrera O.A. & Peña C. 2005. Consumo energético, eficiencia de campo y cobertura vegetal en labranza-siembra de maíz en el Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*. 54(1): 11–17.
- FAO-IFA (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes). 2004. Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de NH₃, NO y NO₂ provenientes de las tierras agrícolas. Primera versión. Roma. p. 1-30.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2015. FAOSTAT (FAO Statistics Division). Consultado 16 may. 2016. Disponible en <http://faostat3.fao.org/home/E>.
- Feliciano D., Nayak D., Vetter S. & Hiller J. 2015. CCAFS Mitigation Options Tool. Consultado 23 mar. 2016. Disponible en <https://ccafs.cgiar.org/mitigation-option-tool-agriculture#.V9BhUbjhC01>.
- Flores E.D., De la Cruz R.S.M. & Antolin M.C. 2016. Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Farmer-level Sweet Potato Production Systems in the Philippines. *Asian Journal of Applied Sciences*. 4(1): 110-119.
- Frank F., Montero G., Ricard F., Sirotiuk V. & Viglizzo E. 2014. La huella de carbono en la agroindustria. *En*: Viglizzo E. (ed) Producción primaria: 27-33. Ediciones INTA, La Pampa, Argentina.
- Frohmann A. & Olmos X. 2005. Huella de carbono, exportaciones y estrategias empresariales frente al cambio climático. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). 76 p.
- Gardi C., Angelini M., Barceló S., Comerma, J., Cruz Gaistardo C., Encina Rojas A., Jones A., Krasilnikov P., Mendonça Santos M.L., Montanarella L., Muñiz Ugarte O., Schad P., Vara Rodríguez M.I. & Vargas R. 2014. Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, Comisión Europea-Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg. 176 p.
- Haverkort A.J. & Hillier J.G. 2011. Cool Farm Tool – Potato: Model Description and Performance of Four Production Systems. *Potato Research*. 54: 355–369.
- Herrero M., Havlík P., Valin H., Notenbaert A., Rufino M.C., Thornton P.K., Blümmel M., Weiss F., Grace D. & Obersteiner M. 2013. Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. *Proc Natl Acad Sci USA*. 110(52): 2088–2093.
- IFA (Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes, Italia). 2009. Fertilizers, climate change and enhancing agricultural productivity sustainably, primera edición. International Fertilizer Industry Association. Paris, France. 30 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate Change 2007, Impacts adaptation and vulnerability. *En*: Parry, ML; Canziani, OF; Palutikof, JP; van der Linden, PJ; Hanson, CE (eds) Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge UK: Cambridge University Press. p. 976-2007.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. *En*: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. & Midgley P.M. (eds) Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: 976-2007. Cambridge University Press. Cambridge UK.
- Lal R. 2004. Carbon emissions from farm operations. *Environ Int*. 30: 981–990.
- Linquist B.A., Adviento-Borbe M.A., Pittelkow C.M., van Kessel C. & van Groenigen K.J. 2012. Fertiliser management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis. *Field Crops Research* 135: 10-21.
- Ma B.L., Liang B.C., Biswas D.K., Morrison M.J. & McLaughlin N.B. 2014. The carbon footprint of maize production as affected by nitrogen fertilizer and maize-legume rotations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 94(1): 15-31.
- Marquina S., Pérez T., Donoso L., Giulante A., Rasse R. & Herrera F. 2015. NO, N₂O and CO₂ soil emissions from Venezuelan corn fields under tillage and no-tillage agriculture. *Nutr Cycl Agroecosyst*. 101: 123–137.
- Milne L., Neufeldt H., Rosenstock T., Smalligan M., Cerri C.E., Malin D., Easter M., Bernoux M., Ogle S., Casarim F., Pearson T., Bird D.N., Steglich E., Ostwald M., Deneff K. & Paustian K. 2013. Methods for the quantification of GHG emissions at the landscape level for developing countries in smallholder. *Environmental Research Letters* 8. 9 p.
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego). 2015. Sistema Integrado de Estadística Agraria. Insumos y Servicios Agrarios. Estadística de insumos agrarios. Lima, Perú. pp. 138-141.
- Montaldo A. 1991. Cultivo de raíces y tubérculos, segunda edición. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Libros y materiales educativos. San José, Costa Rica. No. 21. 408 p.
- Moran D., MacLeod M., Wall E., Eory V., McVittie A., Barnes A., Rees B., Pajot G., Matthews R., Smith P. & Moxey A. 2008. Developing carbon budgets for UK

- agriculture, land-use, land-use change and forestry out to 2022. *Climate Change* 105: 529-553.
- Nayak D., Saetan E., Cheng K., Wang W., Koslowski F., Cheng Yan-Fen., Yun Zhu W., Wang Jia-Kun., Liu Jian-Xin. & Moran D. 2015. Management opportunities to mitigate greenhouse gas emissions from Chinese agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 209: 108-124.
- Nyakatawa E.Z., Mays D.A., Way T.R., Watts D.B., Torbert H.A. & Smith D.R. 2011. Tillage and Fertilizer Management Effects on Soil-Atmospheric Exchanges of Methane and Nitrous Oxide in a Corn Production System. *Applied and Environmental Soil Science*. 12 p.
- Ogle S.M., Breidt F.J. & Paustian K. 2005. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperature and tropical regions. *Biogeochemistry*. 72: 87-121.
- Olander L.P. 2011. Using Biogeochemical Process Models to Quantify Greenhouse Gas Mitigation from Agricultural Management Projects. Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions. 35 p.
- Olivet Y., Ortiz A., Cobas D., Blanco A. & Herrera E. 2012. Evaluación de la labranza para el cultivo de boniato (*Ipomea batatas* L.) en un suelo Fluvisol. *Re. Cie. Agr.* 21: 24-29.
- Pandey S. & Gardner C.O. 1992. Recurrent selection population, variety and hybrid improvement in tropical maize. *Adv. Agron.* 48: 1-87.
- Richards M., Metzel R., Chirinda N., Ly P., Nyamadzawo G., Duong Q., de Neergaard A., Oelofse M., Wollenberg E., Keller E., Malin D., Olesen J.E., Hillier J. & Rosenstock T.S. 2016. Limits of agricultural greenhouse gas calculators to predict soil N₂O and CH₄ fluxes in tropical agriculture. *Sci. Rep.* 6: 1-8.
- Rosenzweig C., Jones J.W., Hatfield J.L., Ruane A.C., Boote K.J., Thorburn P., Antle J.M., Nelson G.C., Porter C., Janssen S., Asseng S., Basso B., Ewert F., Wallach D., Baigorria G. & Winter J.M. 2013. The agricultural model intercomparison and improvement project (AgMIP): protocols and pilot studies. *Agricultural and Forest Meteorology*. 170: 166-182.
- SEEG (Sistema de Estimación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, Perú). 2014. Sector agropecuario (1990-2013). Perú. Consultado 03 jun. 2016. Disponible en <http://seegperu.org>.
- Shan J. & Yan X. 2013. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils. *Atmospheric Environment*. 71: 170-175.
- Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H., Humar P., McCarl B., Ogle S., O'Mara F., Rice C., Scholes B., Sirotenko O., Howden M., McAllister T., Pan G., Romanenkov V., Schneider U. & Towprayoon S. 2007. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 118: 6-28.
- van Kessel C., Venterea R., Six J., Adviento-Borbe M.A., Linquist B. & van Groenigen K.J. 2013. Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis. *Global Change Biology*. 19(1): 33-44.
- WB (World Bank). 2013. CO₂ emissions (metric tons per capita). Carbon Dioxide Information Analysis Center, Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA. Consultado 09 jun. 2016. Disponible en <http://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC>.
- Wolf J. 2002. Comparison of two potato simulation models under climate change. II. Application of climate change scenarios. *Climate Research*. 21: 187-198.
- World Resources Institute. 2014. CAIT Climate data explorer. Consultado 13 ene. 2016. Disponible en <http://cait.wri.org/>.
- Zhang Wei-feng., Dou Zheng-xia., He P., Ju Xiao-Tang., Powlson D., Chadwick D., Norse D., Lu Yue-Lai., Zhang Y., Wu L., Chen Xin-Ping., Cassman K.G. & Zhang Fu-Suo. 2013. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China. *Proc Natl Acad Sci USA*. 110(21): 8375-8380.

¹ Graduando del Programa de Doctorado en Agricultura Sustentable. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. Instituto de Investigación Agropecuario de Panamá (IDIAP). International Potato Center (CIP). Crop and Systems Sciences Division. Lima, Perú. rodrigoamorales@gmail.com.

² Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad Agronomía. Lima, Perú. perczyk@lamolina.edu.pe. Autor de correspondencia.

³ Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Economía y Planificación. Lima, Perú. fmendiburu@lamolina.edu.pe. International Potato Center (CIP). Crop and Systems Sciences Division. Lima, Perú. f.mendiburu@cgiar.org.

⁴ International Potato Center (CIP). Crop and Systems Sciences Division. Lima, Perú. r.quiroz@cgiar.org.