

MERCADO VIRTUAL DEL AGUA EN MÉXICO: UNA ESTRATEGIA DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

VIRTUAL WATER MARKET IN MEXICO: A STRATEGY FOR ADAPTATION AND MITIGATION TO CLIMATE CHANGE

Fernando Paz^{1†}, Luis Alberto Palacios², Víctor M. Salas³, Martín A. Bolaños⁴, Mario Cuesta⁵ y José Inés Zúñiga⁵

¹ GRENASER, Colegio de Postgraduados, *campus* Montecillo, Montecillo, Estado de México, México

² Servicios y Estudios en Ingeniería y Sistemas, S.A. de C.V., Hermosillo, Sonora, México

³ Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua, México

⁴ Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, *campus* Montecillo, Montecillo, Estado de México, México

⁵ Agroindices S.C., Querétaro, Querétaro, México

† Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

RESUMEN

Actualmente los desarrollos en la gestión integral del agua en cuencas, y sus efectos en la operación de las presas de los distritos de riego del país es de bajo impacto operativo, además de no reflejar la dinámica de cambios de usos del suelo y vegetación en las cuencas asociadas por falta de información actualizada, provocando condiciones de alta vulnerabilidad ante eventos hidrometeorológicos adversos, especialmente bajo escenarios de cambio climático. La falta de integración de acciones de mitigación y adaptación al cambio climático, particularmente en la gestión territorial del carbono, imposibilitan la armonización del recurso agua y carbono en los esquemas actuales de desarrollo en el país. La propuesta para el desarrollo e implementación de un mercado virtual del agua en México, y su acoplamiento a los mercados del carbono, permitiría reducir la vulnerabilidad climática de la gestión hídrica, facilitando los procesos para lograr la seguridad alimentaria y promover el desarrollo rural sostenible bajo en carbono, entre otros. La gestión integral del agua y el carbono, usando instrumentos financieros, permite crear los medios para valorar servicios ambientales, además de poder mitigar los efectos adversos de la escases y exceso de las aportaciones en las presas de México, a través del manejo de un portafolio nacional que puede ser de interés para los operadores internacionales de gestión de riesgos. Para poder desarrollar e implementar el mercado virtual del agua y del carbono, basado en resultados, la propuesta articula los insumos necesarios para su desarrollo bajo un esquema de hidrología Darwiniana acoplada a la operación de los distritos de riego y asocia el problema de los usuarios aguas arriba con los de aguas abajo, además de considerar las interacciones de las zonas urbanas y rurales, en el contexto de las cuencas hidrológicas. El alcance de la propuesta es a nivel nacional y considera todas las cuencas del país, con particular énfasis en las presas asociadas a los distritos y zona de riego.

Palabras Clave: *distritos de riego; políticas de operación de presas; seguros paramétricos; riesgos; hidrología Darwiniana.*

ABSTRACT

Currently, the developments in the integral management of water in basins, and its effects on the operation of the dams of the irrigation districts of the country is of low operational impact, in addition to not reflecting the dynamics of changes in land use and vegetation in the associated basins due to lack of updated information, causing conditions of high vulnerability to adverse hydrometeorological events, especially under climate change scenarios. Likewise, the lack of integration of actions to mitigate and adapt to climate change, particularly in

territorial carbon management, makes it impossible to harmonize the water and carbon resources in the current development schemes in the country. The proposal for the development and implementation of a virtual water market in Mexico, and its coupling to carbon markets, would reduce the climate vulnerability of water management, facilitating the processes to achieve food security and promote sustainable rural development low in carbon, among others. The integral management of water and carbon, using financial instruments, allows creating the means to value environmental services, in addition to being able to mitigate the adverse effects of the shortage and excess of water contributions in the dams of Mexico, through the management of a portfolio that may be of interest to international risk management operators. To develop and implement the virtual water and carbon market, based on results, the proposal articulates the necessary inputs for its development under a Darwinian hydrology scheme coupled with the operation of irrigation districts and associates the problem of water users upstream with downstream, in addition to considering the interactions of urban and rural areas, in the context of hydrological basins. The scope of the proposal is at the national level and considers all basins.

Index words: *irrigation districts; dam operating policies; parametric insurance; risks; Darwinian hydrology.*

INTRODUCCIÓN

Los informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2014) muestran evidencia de la presencia de un calentamiento global del planeta, lo cual agravará las presiones sobre la agricultura de riego y de temporal. Los escenarios simulados (para el año 2080) de los patrones asociados al cambio climático en México (Hulme y Sheard, 1999) muestran un cambio en las temperaturas de 2.5 a 5.5 °C, dependiente de la región del país y escenario utilizado. Con relación a la precipitación se estimó una disminución para la mayor parte del país de hasta un 30 % en el escenario medio alto (De Wit y Stankiewicz, 2006). Otras simulaciones de escenarios climáticos en México (INE-SEMARNAT, 2006; entre otros) muestran tendencias similares.

Los cambios en los patrones de precipitación y temperatura asociados al cambio climático modificarán el manejo agrícola, requiriendo el desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación para poder reducir los impactos negativos del cambio climático. En estudios relativamente recientes (Seager *et al.*, 2007), el escenario climático es más grave en relación con la presencia de sequías prolongadas, particularmente en el norte y noroeste de México, donde el cambio climático (sequías más severas que las históricas) se considera como un hecho.

El análisis del impacto del calentamiento global en México y el desarrollo de medidas de adaptación se ha estudiado para el sector agua (Morales *et al.*, 2003) y agrícola (Magaña, 1999 y 2005; Conde *et al.*, 2006; Ehbe *et al.*, 2006). Un aspecto enfatizado en los estudios

de los impactos del cambio climático y medidas de adaptación es el desarrollo de sistemas de pronóstico temprano, para estar preparados para reducir el impacto de eventos adversos (Liverman, 2000; Harris y Robinson, 2001; Gay *et al.*, 2004). Evidentemente, este sistema de advertencia es un desarrollo necesario para reducir los impactos del cambio climático, pero difícil de implementar en términos operacionales.

Es importante aclarar que la discusión de la propuesta del desarrollo de un mercado virtual del agua (transferencias monetarias del costo del agua y no físicas) esta orientada a la parte técnica del esquema, hacia distritos de riego con presas de almacenamiento. La consideración de servicios ambientales e impactos en las actividades productivas en las cuencas no es considerada en la perspectiva abordada en este trabajo y será considerada en otra contribución de los autores bajo la consideración de mecanismos conjuntos cuenca hidrográfica – zonas agrícolas.

GESTIÓN DE RIESGOS HÍDRICOS, MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

En relación con el cambio climático, México ha tomado acciones, principalmente de mitigación de emisiones de gases efecto invernadero (GEI), con la puesta en marcha de convenios y tratados internacionales de los cuales es signatario, como el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC, 2014) en lo general y en lo particular el Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 2015a) y el Acuerdo de

París (UNFCCC, 2015b). En este contexto, el desarrollo de los mercados del carbono en México es una tarea pendiente, particularmente en el contexto del impuesto sobre combustibles fósiles (SHCP, 2014) que fue planteado hace algunos años, el cual define la demanda en el país, independientemente de los mercados y mecanismos internacionales. En una perspectiva de gestión integral del territorio, la gestión del agua y el carbono requiere de nuevos paradigmas que permitan acoplar políticas públicas en una visión de desarrollo rural sostenible bajo en emisiones. En esta tarea son críticos los sistemas de gestión de riesgos climáticos que reduzcan la vulnerabilidad de las zonas de alto riesgo del país ante eventos hidrometeorológicos adversos.

La presencia de eventos catastróficos del tipo hidrometeorológico en las últimas décadas ha ido en ascenso, así como su impacto (Hoyois *et al.*, 2006). El clima (“normal” y el cambio climático) puede ser un factor de riesgo de las actividades agrícolas, pero también es una oportunidad (Swiss Re, 2002). Una estrategia para poder manejar el riesgo asociado al clima es la gestión de riesgos (retención, manejo y transferencia) (AGROASEMEX, 2005; Andersen, 2007), esencialmente financiera, que permite minimizar sus impactos. En especial, el desarrollo de esquemas de seguros y reaseguros ante eventos climáticos negativos es una de las áreas de mayor interés de desarrollo (Redja, 2001; Freeman y Kunreuther, 2003; Arias y Covarrubias, 2006), particularmente por su relación con el cambio climático (UNDP/FIELD, 2003; UNFCCC, 2007; World Bank Group/Global Environmental Facility Program, 2007).

La degradación de los recursos naturales y el riesgo de eventos dañinos están íntimamente relacionadas (ADPC, 2004; UNFCCC, 2007). Asimismo, los pobres son la población más vulnerable ante eventos climáticos catastróficos, o de menor impacto, provocando un círculo de pobreza muy difícil de romper (Skees *et al.*, 2002; Saldaña, 2006; Osbahr y Few, 2006).

Desde la perspectiva de país, los eventos climáticos extremos pueden provocar una reducción del crecimiento económico y la transferencia de recursos financieros destinados a otros usos para mitigar los efectos de los impactos (Rasmussen, 2004). Aunque los desastres naturales atribuidos a eventos climáticos pueden ser usados como mecanismos de nuevas oportunidades de una gestión de riesgos (Crespo y Hlouskova, 2004), la falta de transparencia en el uso de fondos de emergencia en situaciones de desastres naturales impone serias restricciones a esta opción (Transparency International,

2005), además de las presiones políticas por soluciones de corto plazo. Aunque se puede argumentar que la variabilidad del clima es normal (Swiss Re, 2002), es necesario adaptarse a lo inevitable (UNDP, 2007). La gestión de riesgos usando diferentes esquemas es una estrategia que requiere explorarse a mayor detalle en México y ha sido propuesto como un mecanismo para reducir la vulnerabilidad del país ante eventos climáticos catastróficos (Kreimer *et al.*, 1999; Carpenter, 2000; AGROASEMEX, 2005; Arias y Covarrubias, 2006).

En México la SAGARPA (hoy SADER) contaba hasta el 2019 con esquemas de subsidios a primas de seguros para asistir al sector ganadero y agrícola ante eventos climáticos dañinos. Aunque se ha argumentado que el uso de fondos públicos, nacionales o internacionales, para mitigar los efectos de eventos climáticos dañinos conlleva un Dilema del Samaritano (Buchanan, 1975; Coate, 1995), donde los favorecidos por la ayuda económica no hacen nada para mitigar los riesgos futuros y suponen que la ayuda llegará si se presentan, generan un círculo vicioso de mayor exposición al riesgo y mayor necesidad de recursos económicos; haciendo financieramente insostenible la operación de los fondos públicos de ayuda; es claro que este tipo de fondos, manejados en forma eficiente y transparente, pueden ser importantes apoyos para la gestión racional de riesgos. Para romper este dilema es necesario el desarrollo de estrategias alternativas de gestión de riesgos.

La experiencia mexicana en la gestión de riesgos agropecuarios

La evolución del riesgo climático, y su impacto en las actividades productivas, ha abierto el desarrollo de nuevos mercados asociados al tiempo meteorológico (Dischel, 2002). Así, se han propuesto mecanismos financieros que van desde los seguros y reaseguros (Dischel, 2002, Arias y Covarrubias, 2006; Andersen, 2007) a los derivados climáticos (Geman, 1999; Andersen, 2007), donde sobresale el mercado de futuros y opciones (Hull, 2002) como un mecanismo global de gestión de riesgos más allá del mercado convencional de seguros y reaseguros.

México, a través de AGROASEMEX (Agencia mexicana de desarrollo de la gestión de riesgos), ha sido pionero en el desarrollo e implementación de seguros paramétricos agropecuarios (Arias y Covarrubias, 2006), donde el término se refiere al uso de índices o indicadores asociados a la variable de interés a cubrir. Considerando

la dificultad de contar con información histórica asociada a estadísticas de producción agropecuaria, el uso de esquemas paramétricos (indirectos) permite hacer operativos los seguros agropecuarios usando enfoques alternativos (AGROASEMEX, 2006a). La precipitación, con su componente de impredecibilidad, ha sido uno de los índices de mayor uso en el desarrollo de seguros paramétricos y derivados financieros (Muller y Grande, 2000; Martin *et al.*, 2001; Zeuli y Skees, 2005). El uso de un seguro basado en solo la precipitación conlleva riesgos importantes de base (Arias y Covarrubias, 2006; AGROASEMEX, 2006a), donde un siniestro asociado a un umbral de precipitación puede no tener una representación en la realidad de campo. Así, los desarrollos en agricultura de los seguros paramétricos en México se han basado en el acoplamiento de modelos biofísicos de producción de los cultivos y la precipitación (y otros datos climatológicos) (AGROASEMEX, 2006a). Este enfoque reduce el riesgo de base (error de predicción) y hace más transparente el uso de los seguros paramétricos.

Aunque se han planteado esquemas paramétricos de seguros asociados a la precipitación para la ganadería (Skees y Enkh-Amgalan, 2002), su uso tiene un riesgo de base importante para ser usado en términos operacionales. Ante esta perspectiva, AGROASEMEX ha desarrollado un esquema operativo de seguro ganadero paramétrico satelital (AGROASEMEX, 2006b; Paz *et al.*, 2006; Paz *et al.*, 2018a y b). El uso

de sensores remotos en los seguros paramétricos es lo más cercano a los seguros convencionales, donde la respuesta real de la vegetación es observada a través de índices espectrales de vegetación. Así, los sensores remotos no suponen un modelo biofísico o alguna relación entre la producción vegetal y el clima, sino que la miden directamente, a través de las reflectancias. Para la implementación de seguros paramétricos satelitales es necesario la minimización del riesgo de base, de tal forma que los datos satelitales sean equivalentes a datos de medición de la producción de los agostaderos (Paz *et al.*, 2018a).

AGUA Y AGRICULTURA

Distritos de riego y su importancia

Los distritos de riego son áreas geográficas compactas y delimitadas que proporcionan servicio de riego a las parcelas de los usuarios, a partir de diversas fuentes de abastecimiento, sistemas de conducción y distribución. Cuentan con decreto presidencial de creación y título de concesión otorgado a los usuarios organizados en asociaciones civiles para uso de las aguas y la administración, operación y conservación de la infraestructura hidroagrícola federal.

La Figura 1 muestra la distribución de los distritos de riego del país, que dominan una superficie de riego de poco más de 3.2 millones de hectáreas.

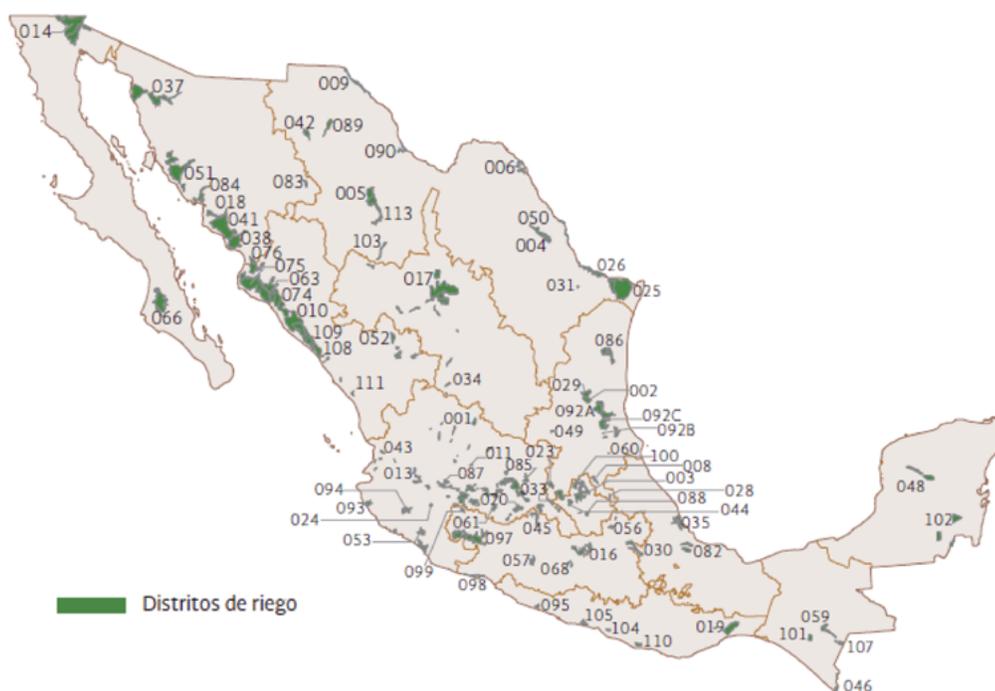


Figura 1. Distribución geográfica de los distritos de riego en el país. Fuente: CONAGUA (2015).

La superficie de los Distritos de Riego (DR) ha venido disminuyendo por la (sobre)concesión del agua a las Unidades de Riego (UR) aguas arriba de las presas y por la reducción de las extracciones en los distritos que se abastecen por pozos profundos, Figura 2. La variabilidad anual se debe al carácter aleatorio de las variables hidrológicas y climatológicas. El valor de la producción agrícola de los distritos de riegos fue de

alrededor de 112 000 millones de pesos en el 2014/2015, lo que pone en contexto su importancia económica, adicional a ser el eje central de la política de seguridad alimentaria del país, por lo que es crítico contar con mecanismos de gestión de riesgos hidrometeorológicos que reduzcan la exposición de esta producción ante el cambio climático y eventos catastróficos.

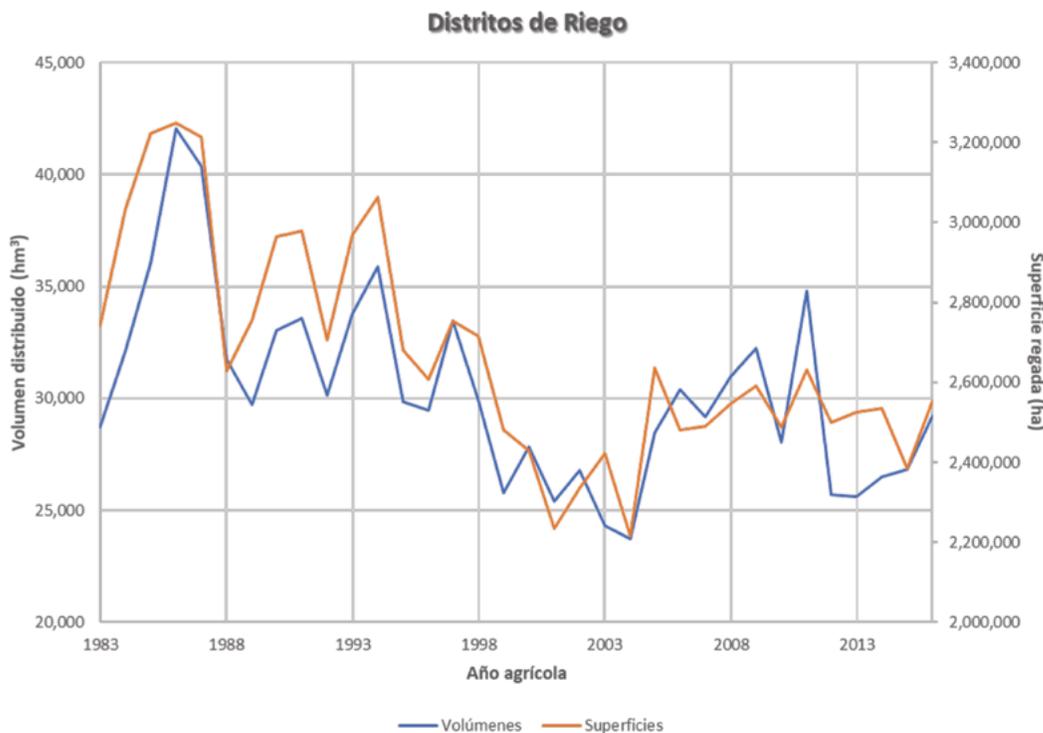


Figura 2. Evolución temporal de los distritos de riego en el país.

Agricultura en distritos de riego y sus riesgos climáticos

En el caso de la agricultura en distritos de riego, principalmente los abastecidos por aguas superficiales, el enfoque de determinación de la vulnerabilidad (y amenazas) es diferente al de la agricultura de temporal, ya que esta depende de los almacenamientos en los embalses o presas del esquema de irrigación.

Un área de alto interés para el país es la asociada al riesgo climático de la disponibilidad de agua en distritos de riego (DR) en México, en especial el relativo a sequías. En muchos DR del país, se cuenta con amplia experiencia en el manejo de los riesgos climáticos en forma directa. No obstante, el desarrollo

de seguros asociados a la disponibilidad de agua para riego es un elemento totalmente nuevo, el cual puede vincularse con una estrategia de desarrollo de productos secundarios o asociados para mejorar el servicio de organizaciones integradas a la agricultura o aseguradores privados.

En la Figura 3 se muestra la distribución de la precipitación media anual en México, donde se observa una alta variabilidad espacial que provoca que el recurso agua esté distribuido en forma heterogénea. La mayor parte de los distritos de riego en el país están localizados en zonas geográficas con baja disponibilidad de agua (Figura 4), se estima que los efectos del cambio climático acentuarán esta situación.

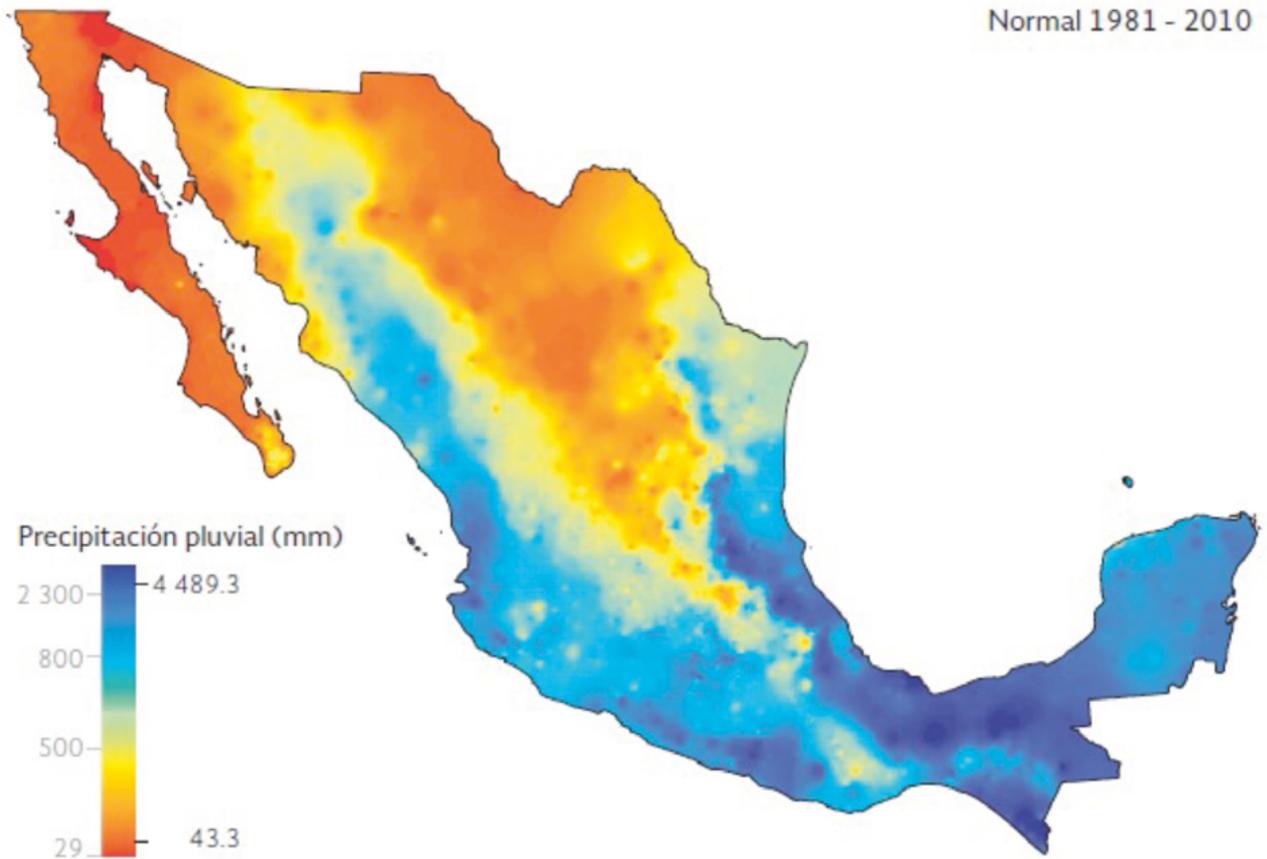


Figura 3. Distribución de la precipitación media anual en México. Fuente: CONAGUA (2015).



Figura 4. Distribución de la disponibilidad de agua en México. Fuente: CONAGUA (2016).

Aunque existen algunas propuestas para el desarrollo de seguros paramétricos ligados a la precipitación en una cuenca hidrológica aportando escurrimientos hacia una o varias presas, estos esquemas tienen un alto riesgo de base, perdiendo su atractivo como seguros paramétricos. El desarrollo de un esquema de seguro paramétrico con un riesgo de base mínimo es una tarea compleja, en especial si consideramos el alto grado de discrecionalidad en la operación de los DR por la autoridad del agua en México (Comisión Nacional del Agua, CONAGUA). Esta discrecionalidad limita el asociar un costo de oportunidad al agua, para establecer primas ligadas a riesgos cuantificables en la disponibilidad del agua.

La propuesta de desarrollo de seguros paramétricos de la precipitación-escurrencimiento en una cuenca hidrológica para asegurar las aportaciones (ingresos o entradas) a una o varias presas interconectadas, tiene las siguientes limitaciones intrínsecas: (a) Aunque es posible establecer una relación estadística entre la precipitación con el escurrimiento superficial (aportaciones), caso clásico de un análisis hidrológico, esta relación es poco confiable ya que no considera los cambios en los usos del suelo (notables en la mayoría

de las cuencas de los DR del país). Así, un análisis estadístico tiende fuertemente a sobreestimar la relación precipitación-escurrencimiento y no refleja las condiciones de operación actual del sistema analizado. En la Figura 5 se muestra el caso de una cuenca hidrológica en México donde la construcción de reservorios de agua (“jagueyes”) ha modificado la respuesta hidrológica en la relación precipitación-escurrencimiento. (b) Las aportaciones a una presa no pueden ser asociadas directamente, sin un alto riesgo de base, con costos de oportunidad del agua para establecer primas de un seguro paramétrico. Los costos de oportunidad del agua son función de los volúmenes disponibles para riego (y los beneficios netos asociados a los cultivos bajo riego) y de la red de distribución del agua (problema clásico de aguas arriba vs aguas abajo), principalmente. Esto introduce una consideración espacial y temporal fuerte en las percepciones de los usuarios con relación con los riesgos de disponibilidad del agua. (c) La no estandarización de un seguro paramétrico (políticas de operación de referencia), hace poco atractivo este producto para su dispersión del riesgo en el mercado internacional.

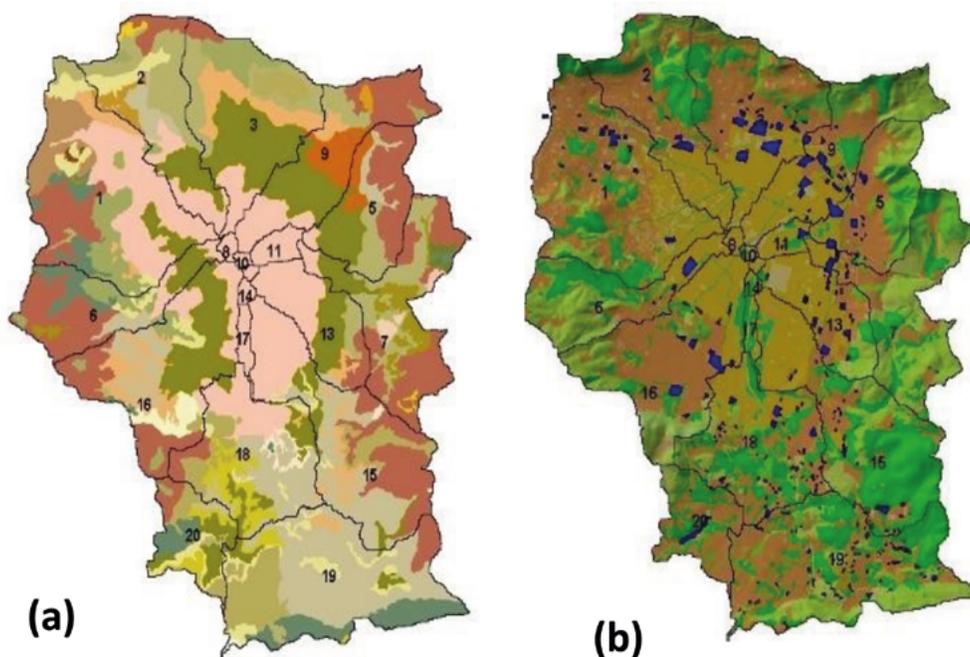


Figura 5. Usos del suelo en una cuenca hidrológica en México. (a) Uso del suelo derivado de información temática disponible (no actualizada) y (b) reservorios de agua en la cuenca y otros cambios del uso del suelo, valorados usando sensores remotos. Fuente: Primer foro del Medio Ambiente Atmosférico en el Estado de Veracruz, Xalapa, Veracruz, 9 y 10 de febrero de 2006. Proyecto del Programa Hidráulico Estatal. p. 4.

La variabilidad espacial en la disponibilidad del agua en México, y entre países a nivel mundial, más los efectos previstos del cambio climático hacen imperativo el desarrollo de un esquema alternativo de gestión de riesgos asociados a la disponibilidad del agua en las presas de almacenamiento en los distritos de riego del país, así como a escala internacional.

Gestión de servicios ambientales y mercados del carbono

En el contexto de acuerdos internacionales de la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) y acciones bi y multilaterales, México ha trabajado en el establecimiento de la línea base de emisiones de gases efecto invernadero en el sector agropecuario y de uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (INECC y SEMARNAT, 2012 y 2015). No obstante, estos esfuerzos, los insumos de estos documentos están a escalas muy gruesas (1: 250 000) para ser aplicables a la escala de micro y subcuencas hidrológicas, tal como se requiere para la propuesta. Adicionalmente, los inventarios del carbono solo contemplan flujos verticales (sistema suelo-vegetación hacia la atmósfera) producto de cambios de usos del suelo y mejoras en las prácticas asociadas, por lo que la conexión con los flujos de agua (horizontales) ha sido explorada en forma fragmentada y parcial (Paz-Pellat *et al.*, 2019).

Considerando que las transferencias horizontales del carbono en el agua producto de escurrimientos superficiales, erosión y transporte de sedimentos de los cauces hacia los almacenamientos, incluyendo los naturales como lagos y lagunas, de los distritos y zonas de riego, y zonas costeras, es importante en la determinación de las emisiones a escala de país (Salas-Aguilar y Paz-Pellat, 2018a; Paz-Pellat *et al.*, 2019), es necesario cuantificar estos flujos en materia de carbono y su asociación a los gastos de agua, para evaluar el impacto de las transferencias cuenca a almacenamientos, además de valorar su impacto en la vida útil de los embalses producto de los sedimentos depositados.

Adicionalmente, los flujos verticales de dióxido de carbono han sido poco estudiados en México y complementan la información necesaria para realizar balances de almacenamientos y flujos de gases efecto invernadero. Con la información de flujos, horizontales

y verticales, en las cuencas y cuerpos de agua, es posible relacionar las cuencas con los distritos o zonas de riego, a través de los flujos de agua que capturan el estado del sistema suelo-vegetación en las cuencas hidrológicas (Paz-Pellat *et al.*, 2019).

Los servicios ambientales de las cuencas hidrológicas, en la perspectiva de los mercados del carbono, pueden ser un elemento clave para un desarrollo bajo en carbono (SEMARNAT, 2012), permitiendo poder acceder a fondos complementarios en función del manejo integrado de estos territorios, particularmente en el esquema de reducción de emisiones de gases efecto invernadero por deforestación y degradación evitada o REDD (UNFCCC, 2016). El acoplamiento de almacenamientos y flujos en un formato territorial de cuencas hidrológicas plantea necesidades de caracterización y modelación que requieren reconceptualizaciones científicas importantes, por lo que es necesario iniciar estos ejercicios de valoración para establecer líneas base. A escala de cuenca, la interacción suelo-vegetación, en conjunto con las actividades antropogénicas, define los patrones hidrológicos y de emisiones que impactan en los embalses y en los balances de carbono.

En términos de los mercados de carbono (World Bank, 2016), el impuesto sobre combustibles fósiles en México (SHCP, 2014) implementado a partir de 2014 define la demanda nacional con relación con los bonos o productos de carbono para su comercialización, independientemente de las opciones de mercados nacionales, regulados o voluntarios. Para poder tener acceso a este tipo de mercados, es necesario una visión holística de las cuencas hidrológicas bajo la perspectiva de manejo de las diferentes partes que se interconectan por los flujos de agua. Los usuarios de los distritos de riego del país deben conjuntar esfuerzos con los usuarios de las cuencas aguas arriba de los embalses, en esquemas de ganar-ganar y con posibles compensaciones financieras por buen manejo. En este sentido, los gastos de agua (aportaciones) que se reciben en los embalses o presas de los distritos de riego pueden ser usados en el diseño de instrumentos financieros basados en resultados, para generar círculos virtuosos de ganancia de agua (cantidad y calidad) y reducción de pérdidas de carbono, verificables en los embalses. Esta posibilidad puede ser explorada en una segunda generación de productos de gestión de riesgos climáticos, aunque primero deben establecerse sus bases (insumos) y alcances.

INSUMOS PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DE CUENCAS HIDROLÓGICAS

La gestión integrada (agua y carbono) de cuencas hidrológicas requiere de información que generalmente no está disponible en México o está con una resolución temporal y espacial limitada y de poco valor para ejercicios de modelación sólidos. Por otro lado, la meteorología e hidrometría no está actualizada y en muchos casos tiene problemas importantes relacionados con el control de calidad. En esta perspectiva, se requiere capitalizar la información existente en México, actualizarla y usarla en ejercicios

de calibración y validación de modelos hidrológicos, bajo un cambio de paradigma científico para poder hacer uso de estos datos, a pesar de sus limitaciones espaciales y temporales.

La Figura 6 muestra las cuencas hidrométricas con datos de sedimentos de México (Salas-Aguilar y Paz-Pellat, 2018a; Paz-Pellat *et al.*, 2019), la gran mayoría de ellos recolectados en décadas pasadas. Los datos de sedimentos en suspensión no contienen información de densidades, ni de contenidos de carbono, por lo que se requiere complementar esta información para ejercicios de calibración y validación de modelos de precipitación-escorrentía y erosión-transporte de sedimentos, entre otras cosas.

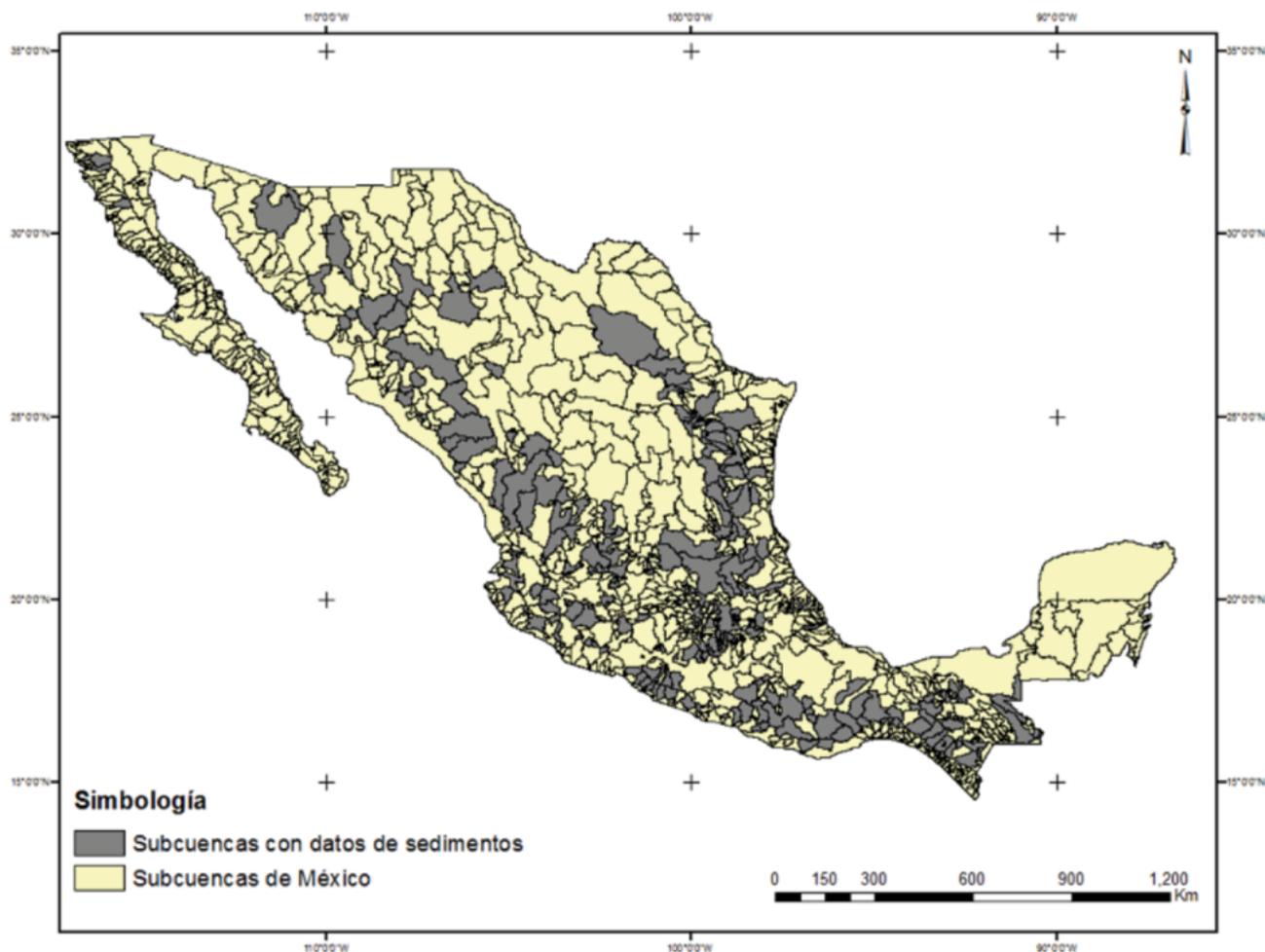


Figura 6. Distribución nacional de cuencas con datos de sedimentos en México. Fuente: Salas-Aguilar y Paz-Pellat (2018a); Paz-Pellat *et al.* (2019).

La delimitación actual de cuencas (subcuencas y microcuencas) es deficiente, dado que se usaron insumos escala 1:250 000, por lo que es necesario crear una nueva generación a escala 1:50 000, en particular la asociada a las cuencas de las estaciones hidrométricas disponibles en el país, para poder realizar ejercicios de calibración y modelación hidrológica, y su asociación a almacenes y flujos de carbono.

Además de datos hidrométricos completos, es necesario contar con una red de mediciones de evapotranspiración actual (E) de los diferentes tipos de usos del suelo y vegetación en las cuencas, para poder relacionarla con los gastos (Q) y precipitación (P). La consideración de la evapotranspiración potencial (Eo), en conjunto con las características de las cuencas y las

actividades antropogénicas, permite utilizar enfoques de hidrología Darwiniana sujeta a principios de ecohidrología (Klemens, 1983; Sivapalan *et al.*, 2003).

La Figura 7 muestra los sitios de medición directa de E y CO₂, técnicas micro meteorológicas (torres de covarianza de vórtices o EC), implementados en el país (Vargas *et al.*, 2012 y 2013; Delgado-Balbuena *et al.*, 2018 y 2019), por lo que se puede usar esta información para calibración y validación de modelos, además de datos de diversos experimentos agrícolas de mediciones de flujos. El uso de esta información, con la ampliación de sitios con torres de EC y mediciones de gastos a la salida de microcuencas, permitirá tener información con sustento científico en el desarrollo de productos de gestión de riesgos.

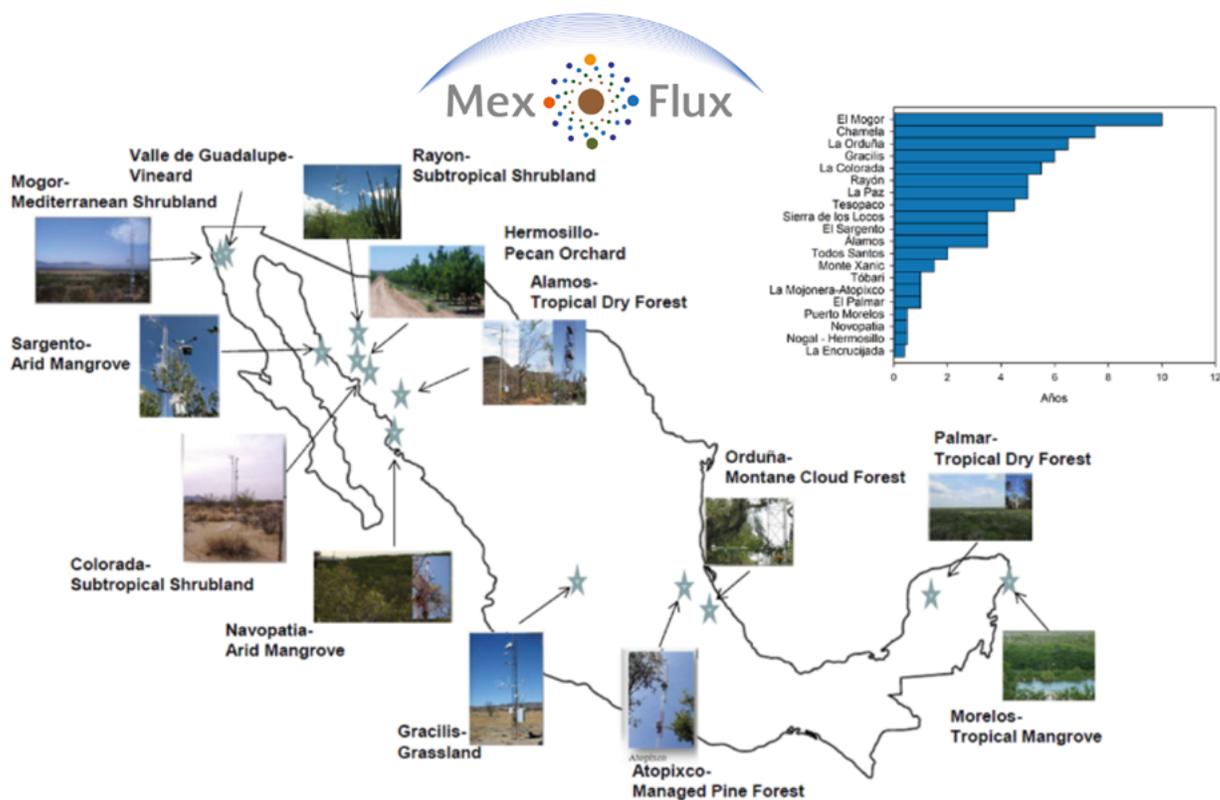


Figura 7. Distribución geográfica de los sitios de mediciones micrometeorológicas (Red MexFlux). Fuente: Delgado-Balbuena *et al.* (2018 y 2019).

La Figura 8 muestra las relaciones entre los flujos ecosistémicos y de agua en los sitios de MexFlux, lo que fundamenta la necesidad de su uso en la propuesta por ser la única técnica de medición directa a escalas finas, más allá de pequeñas áreas con lisímetros. En la actualidad, existe una alianza estratégica entre la

Red MexFlux y el Programa Mexicano del Carbono (PMC) para la realización de síntesis de información, en el contexto de la Iniciativa Agua-Energía y Carbono de expansión e integración de los intereses del PMC (Delgado-Balbuena *et al.*, 2018 y 2019).

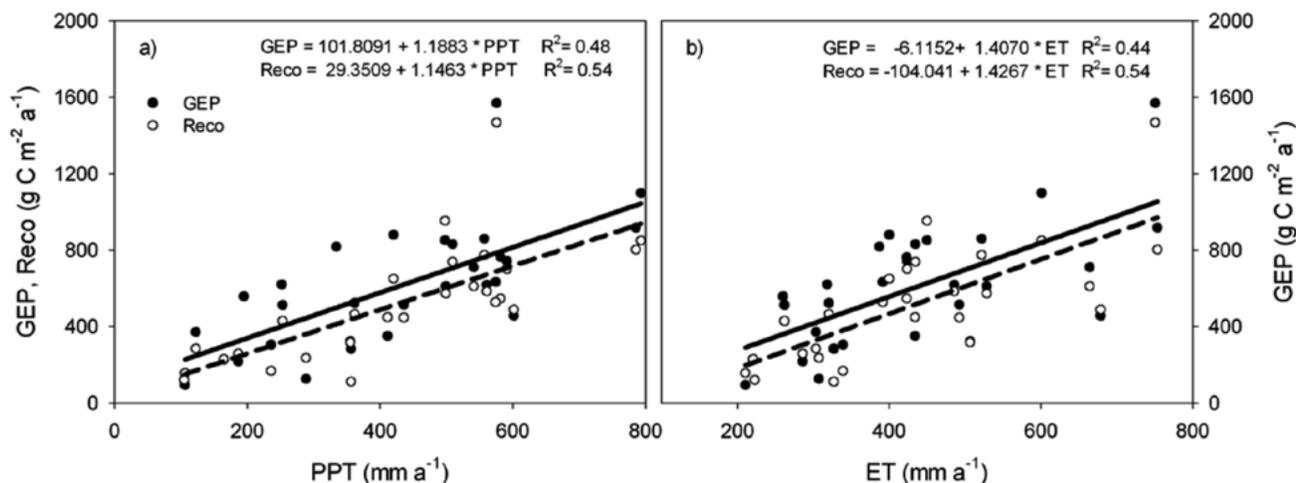


Figura 8. Relaciones entre las variables hidrológicas y los flujos en los sitios de MexFlux, donde PPT = Precipitación, ET = Evapotranspiración, GEP = Productividad bruta del ecosistema y Reco = Respiración del ecosistema. Fuente: Delgado-Balbuena *et al.* (2018).

La caracterización espacial de los almacenes de carbono (biomasa aérea de la vegetación y suelo) en el país está mostrada en la Figura 9. Esta información es a escala 1:250 000, por lo que requiere su análisis a la escala 1:50 000, además de mejorar las técnicas de generación espacial de estimaciones de los almacenes, usando técnicas geoestadísticas Bayesianas avanzadas (Paz y de Jong, 2012).

En el caso de los suelos en México, es necesaria la generación de insumos nacionales relacionados con las propiedades hidráulicas (funciones de pedotransferencia en función de la textura y contenido de materia orgánica del suelo, principalmente) para

poder ser usadas en modelos espacialmente explícitos de la conectividad hidrológica en las cuencas (Bracken y Croke, 2007; Larsen *et al.*, 2012), mediante información geo morfológica (Salas Agilar y Paz Pellat, 2017), meteorológica (Salas-Aguilar y Paz-Pellat, 2018b) y de sensores remotos (Paz *et al.*, 2018c) en una malla nacional con tamaño de celdas de 250 m x 250 m, congruente con la escala 1:50 000 planteada para los productos de esta propuesta. La información hidrométrica nacional disponible (Salas-Aguilar y Paz-Pellat, 2018a; Paz-Pellat y Salas-Aguilar, 2019) debe ser usada para calibrar/validar modelos hidrológicos.

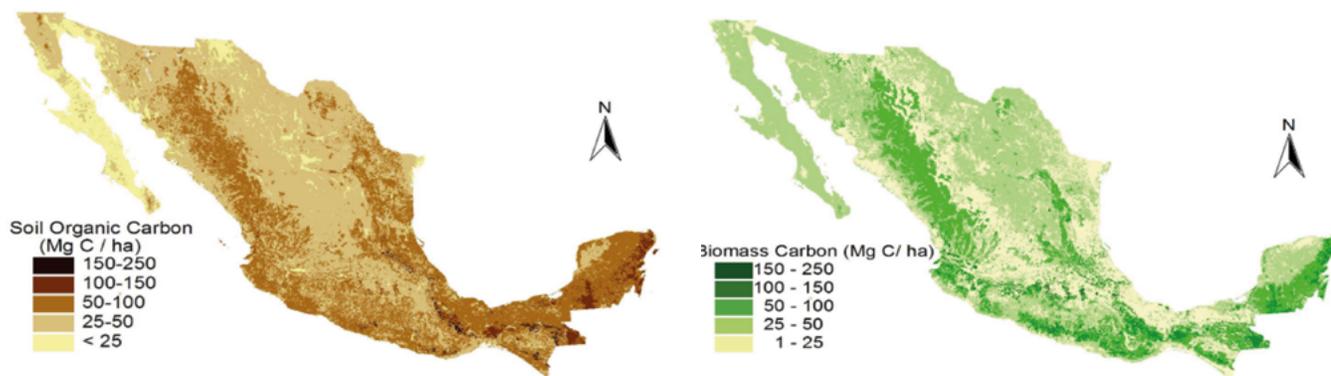


Figura 9. Almacenes de carbono en la biomasa aérea de la vegetación y el suelo (profundidad de 0-30 cm) en México.

En lo general, es necesario la realización de acciones para complementar y actualizar los insumos necesarios para poner en marcha el proyecto a escala nacional.

SISTEMA DE GESTIÓN DE RIEGOS

Se considera que la vulnerabilidad manifiesta del país a desastres naturales hace necesario el desarrollo e instrumentación de estrategias y mecanismos financieros que mitiguen los efectos de estos acontecimientos, para lo cual resulta indispensable llevar a cabo la cuantificación y evaluación de los riesgos que se asumen, a través de la definición técnica de los componentes de exposición y frecuencia de amenazas con el fin de estimar los daños que puede enfrentar con cargo a sus recursos y los que, por la característica catastrófica del evento, pueden llegar exceder su capacidad media.

La correcta estimación de estas dos variables permite definir técnicamente los recursos que deban asignarse como parte del presupuesto federal, estatal o local y el diseño de esquemas de protección para transferir al mercado internacional los excedentes, es decir, la construcción de un sistema de gestión de riesgos que tenga como objetivos:

- a). Estabilizar el uso de los recursos, evitando reasignaciones presupuestales, públicas o privadas, imprevistas ante la ocurrencia de una catástrofe;
- b). Fortalecer la estrategia federal, estatal o local, con los recursos suficientes para hacer frente a los daños derivados de eventos naturales de alto impacto o de impacto menor, pero con mayor duración, con la reducción del costo de capital de las instituciones públicas o privadas.
- c). Proteger las desviaciones financieras a las que están expuestas las instituciones públicas o privadas.
- d). Optimizar los recursos presupuestales para enfrentar este tipo de eventos.
- e). Reducir la vulnerabilidad de la población marginada de los servicios financieros.
- f). Agilizar el flujo de recursos a la población afectada, mejorando su capacidad de recuperación y resistencia a este tipo de eventos.

En la literatura relacionada (IPCC, 2012) se considera que los componentes fundamentales del riesgo son la *exposición* y la *frecuencia* con la que cada

una de las amenazas puede ocurrir (vulnerabilidad). El primer elemento se refiere a los bienes o intereses que pueden afectarse ante la ocurrencia de un evento adverso, en tanto que el segundo a las veces en que una amenaza particular (ciclón, sequía o inundación; por mencionar algunos) se materializa.

En este contexto, se considera que, para la instrumentación de un sistema de gestión de riesgos, es indispensable disponer de la medición de los principales riesgos que se enfrentan, particularmente, aquellos que han tenido un mayor impacto en el patrimonio de los productores rurales. Para ello, se hace necesaria la construcción de modelos que describan las amenazas, en términos de frecuencia y severidad, así como su impacto en los bienes protegidos (exposición).

Al disponer de estos escenarios o simulaciones de catástrofes naturales asociadas al cambio climático y las intrínsecas a la variabilidad climática actual será posible cuantificar las pérdidas potenciales derivadas de un evento y de diversos eventos que se presenten simultáneamente. Asimismo, permitirán ubicar áreas geográficas factibles de ser afectadas, estimar la recurrencia de los fenómenos, y su intensidad.

Por otra parte, una vez determinadas las pérdidas potenciales que se enfrentarían, es factible la identificación de eventos atípicos de alto impacto económico y la definición de criterios técnicos para su transferencia al mercado internacional a través de los instrumentos financieros que se definan en función de su eficiencia.

La modelación de los riesgos requiere necesariamente de una base de datos histórica que permita una buena representación de la realidad. En la medida que la información provenga de fuentes confiables y sea extensa, se estará en mejores condiciones de desarrollar modelos con menor grado de incertidumbre, aunque hay que señalar que todo modelo contiene incertidumbre aun cuando el conjunto de datos sea suficientemente grande como para permitir la creación de una imagen representativa de lo real.

Debe señalarse que, en el caso de catástrofes naturales, la presencia de incertidumbre es una condición básica para que puedan existir esquemas de gestión de riesgos; no obstante, y a pesar de esta incertidumbre que hace imposible predecir con exactitud un evento individual, existe la posibilidad de pronosticar cuántos eventos y de qué magnitud pueden ocurrir, en promedio, durante el curso de un determinado periodo de tiempo. En este contexto, la construcción de una base de datos resulta fundamental para la creación de un sistema de gestión de riesgos.

Al combinar la información anterior con conocimientos científicos-naturales especializados, es posible identificar geográficamente las pérdidas potenciales derivadas de fenómenos naturales, las que son susceptibles de agruparse por su impacto y frecuencia en eventos esperados (frecuencia media e impacto económico medio) y eventos extremos (frecuencia baja y alto impacto económico). De igual manera, es factible clasificarlas por horizonte de tiempo, regiones geográficas, tipo de bienes afectados, etc.

La modelación de las pérdidas potenciales requiere de la definición de una metodología específica que permita estimar las pérdidas acumuladas por activo público o privado y sector, así como la creación geográfica de unidades de riesgo (UR) con niveles similares de vulnerabilidad, la cual debe sustentarse en los supuestos teóricos y empíricos utilizados por la comunidad internacional para la modelación de los fenómenos naturales y la cuantificación de los riesgos derivados de cada una de las amenazas, con objeto de facilitar, en su momento, la transferencia del riesgo hacia el mercado financiero internacional.

Un punto crítico en la modelación de los riesgos lo representan los niveles de incertidumbre inherentes a la estimación de índices o parámetros, por lo que es necesario desarrollar una metodología de análisis orientada a reducir estos niveles, que se fundamente en los supuestos metodológicos utilizados por la industria, literatura y demás fuentes aplicables.

Con objeto de tener una valuación objetiva del riesgo y poder diseñar un instrumento financiero que permita su eficiente administración (seguros, bonos, reaseguro, etc.), es necesario diseñar índices o parámetros susceptibles de ser tomados por el mercado. De inicio es indispensable desarrollar los índices necesarios para el objetivo planteado, uno para cada riesgo modelado y un agregado que simule la interacción entre los riesgos.

Cada uno de estos índices debe analizarse en función de: i) variables físicas tales como, por ejemplo, para ciclones tropicales la presión central, lluvia asociada, vientos, entre otros; y ii) variables financieras que muestren las pérdidas esperadas por cada índice en forma individual o conjuntamente.

De esta manera, se pretende que los valores de cada índice al interactuar con los riesgos y la exposición puedan ser estimados a través de técnicas de simulación y modelos probabilísticos, a partir de las cuales se esté en condiciones de construir la distribución de probabilidad de pérdidas que arrojaría cada índice de riesgo en particular o en conjunto.

Al igual que en la modelación física se considera conveniente que los supuestos y metodologías utilizadas para del diseño de los índices antes mencionados, sean consistentes con los utilizados por la industria de empresas de modelaje de riesgos.

Concluidas las fases anteriores, se tendrían los elementos necesarios para diseñar y evaluar diferentes estrategias financieras que permitan instrumentar un sistema de gestión de riesgos, en dos vertientes fundamentales: (a) Retención: Mediante la determinación de los criterios técnicos que fundamenten el monto de recursos que deban asignarse a un fondo asociado al cambio climático, con el objetivo de absorber las pérdidas económicas medias generadas por la ocurrencia de catástrofes relacionadas con el cambio climático y dar estabilidad a la asignación de los recursos fiscales destinados a tales fines. (b) Dispersión y transferencia: A través del diseño de estrategias que permitan enfrentar las pérdidas generadas por desviaciones significativas de siniestralidad provocada por eventos naturales de magnitud catastrófica, con el propósito fundamental de minimizar el costo de capital en que incurren las instituciones públicas o privadas para financiar las pérdidas ocasionadas en forma individual o combinada por los riesgos descritos.

Para el logro de lo anterior, se requiere necesariamente de la construcción de portafolios de riesgos que permita explorar diferentes estrategias de cobertura para cada riesgo y sector u otros grupos de exposición, así como de un análisis de sensibilidad y estudio de factibilidad para la colocación, en el mercado nacional e internacional, de los diversos instrumentos financieros que en este proceso se identifiquen.

En lo general, las amenazas relacionadas con eventos climáticos pueden ser determinadas bajo dos consideraciones: la histórica (malla climática nacional) y la de los escenarios proyectados del cambio climático. La información climática histórica es usada para calibrar diferentes modelos o aproximaciones de respuestas de la vegetación o animales o cuencas hidrológicas, así como de los medios ambientes donde se distribuyen estos seres vivos o respuestas.

MERCADO VIRTUAL DEL AGUA Y SUS ELEMENTOS

Mercados clásicos del agua

La asignación del recurso agua al uso más eficiente económicamente es una de las justificaciones

principales para el desarrollo del mercado del agua. Así, la auto-regulación del mercado es supuesto como un mecanismo eficiente de valorar un recurso escaso y promover su uso eficiente. Algo similar puede decirse del recurso tierra; aunque el agua y la tierra son recursos complementarios y ligados entre sí en la actividad agrícola.

La función primaria de los mercados es hacer que la oferta se estabilice con la demanda de un bien o servicio, en una manera que refleje las prioridades económicas de las demandas en competencia. Los mercados del agua y de la tierra son una de muchas herramientas que pueden ser usadas para lograr el uso eficiente de estos recursos. Para la operación de un mercado del agua es necesaria la valoración de este recurso (Johansson, 1998).

De acuerdo con el trabajo de Simpson y Ringskog (1997), los prerequisites para un mercado de agua exitoso pueden ser enunciados como sigue:

- a). Debe haber un producto definido para comerciar en el mercado. El producto debe ser controlable, medible y comerciable como un bien. Los derechos de agua deben generar seguridad y confianza de ser viables.
- b). La demanda debe exceder la oferta. Es necesario que el bien no esté disponible en exceso para que las demandas compitan.
- c). Las ofertas derivadas de los derechos de uso deben ser transportadas hacia donde el agua es necesaria y deben estar disponibles cuando se necesitan. El recurso agua debe ser movable para ser transferido de un lugar de exceso de oferta a otro de uso económico.
- d). Los compradores deben sentir confianza de que recibirán y serán capaces de usar el derecho comprado. El valor de esta confianza se refleja en el precio. Para que exista un mercado del agua, debe existir un sistema administrativo y regulatorio que sea respetado por el mercado.
- e). El sistema de derechos de agua debe resolver los conflictos que se le presenten. La resolución de los conflictos debe ser visto por el mercado como justa e imparcial y de ser capaz de tomar acciones efectivas y en tiempo.
- f). El sistema de derechos de agua debe proratear la oferta durante los periodos de escasez y exceso. El mercado debe ser operado dentro de un marco legal que defina la cantidad de agua disponible a cada usuario en cada año.
- g). Los criterios y mecanismos de compensación adecuada a los usuarios cuando sus derechos sean confiscados o transferidos a otros usos de mayor preferencia de la sociedad deben estar bien definidos y deben ser asegurados en su cumplimiento.
- h). Es crucial en evaluar la aceptabilidad potencial de los mercados del agua que los valores culturales y sociales del recurso agua sean considerados.
- i). Cualquier programa de manejo, incluyendo un sistema basado en el mercado, para que sea exitoso en el largo plazo debe ser financieramente sostenible. Deben existir cargos asociados al costo del agua que reflejen los costos asociados del capital de la infraestructura de extracción del agua y los de su administración.

Antes de 1992, en México la transmisión de derechos de agua estaba prohibida, aunque en la práctica esta se daba por el aprovechamiento de la discrecionalidad de las autoridades. A partir de 1992 se expidió la nueva Ley de Aguas Nacionales (LAN), lo que permitió la transferencia, temporal y permanente, de los derechos de agua, sujeto a una serie de restricciones. Cambios posteriores en la LAN y sus reglamentos han regulado las transferencias de derechos de agua en forma; aunque el desarrollo de los mercados del agua no se ha dado como se esperaba, principalmente por las marcadas asimetrías y distorsiones existentes en estos mercados.

No obstante, la aparente bondad de los mercados del agua para un uso más eficiente del agua, en términos económicos, su aplicación está restringida a las limitaciones físicas de las transferencias de agua (distrito de riego o cuenca hidrológica).

Seguros paramétricos

El seguro de riesgo paramétrico o de índices es un enfoque relativamente nuevo pero innovador (Arias y Covarrubias, 2006), para proporcionar un seguro que paga indemnizaciones con base en un índice predeterminado, por pérdidas resultantes por efectos climatológicos y/o eventos catastróficos. Ejemplos de estos índices son: lámina de precipitación, velocidad del viento, escala de Richter, índices de vegetación, etc. A diferencia del seguro tradicional, el seguro paramétrico usa un modelo para calcular el pago de la póliza de seguro. Este modelo de pago tiene como objetivo emular, tanto como sea posible, el daño real

en el terreno y permite un pago mucho más rápido, ya que no se requieren ajustadores de siniestro después del evento para evaluar el daño real.

No todos los asegurados se ven igualmente afectados por inundaciones, sequías, terremotos, etc. El seguro convencional indemniza a las personas o empresas por las pérdidas financieras que sufrieron por los riesgos asegurados: no hay pérdida, no hay pago. Las reglas para la indemnización de algún fondo de desastre u otro mecanismo posterior al desastre no siempre son claras y conocidas. La evaluación de pérdidas individuales es demasiado costosa para el seguro masivo de personas de bajos ingresos, por lo que el seguro paramétrico intenta aproximarse al mismo resultado: pago vinculado a pérdidas, con reglas claras. Para lograr lo anterior, el seguro paramétrico requiere el diseño correcto (índices disparadores) y los datos correctos (Paz *et al.*, 2018a)

Para que un seguro paramétrico funcione, es necesario establecer datos precisos sobre inundaciones, temperaturas, ocurrencias de eventos, pérdidas y exposiciones para estimar buenas correlaciones de riesgos y pérdidas como base para los contratos financieros. Entre esta información se puede nombrar: proyección de frecuencia e intensidad de eventos, valoración monetaria de las pérdidas asociadas a los eventos, determinación de la distribución de probabilidad de pérdida, etc.

Los seguros paramétricos deben tener ciertas características: riesgo de base mínimo; es decir, que lo que ocurra a nivel de campo lo refleje el parámetro o índice utilizado para evitar falsos positivos o positivos falsos (es decir, desastres que no se presentan y se hacen pagos y desastres que se presentan y no se hacen pagos); sin riesgo moral; es decir, que los usuarios del seguro no manipulen las condiciones para generar siniestros que de otra manera no se presentarían (caso de una mala operación de la presa de un distrito de riego que provoca un déficit en la disponibilidad de agua en el ciclo agrícola); y, que no presenten riesgos covariados; es decir, que exista una dispersión geográfica de riesgos para que cuando ocurra un siniestro en una región existan otras regiones donde no se presente el siniestro. Esta última condición implica la necesidad de desarrollo de un portafolio de cobertura geográfica a nivel de país.

Gestión del agua en distritos de riego

El gobierno federal es el encargado de operar y conservar las obras de cabeza como son presas de almacenamiento, derivadoras y plantas de bombeo, a

través de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Para un año agrícola determinado, las asociaciones de usuarios definen un Plan de Riegos donde se especifica la superficie de cada cultivo a establecer, así como los volúmenes de agua requerido por los mismos. En el mes de octubre la CONAGUA aprueba o modifica el volumen bruto total a extraer de las fuentes de abastecimiento para el riego de los cultivos en el año agrícola; en caso de aportaciones importantes en invierno, en algunos distritos de riego se hace un ajuste al Plan de Riegos entre febrero y marzo, para agregar las superficies de segundos cultivos y los volúmenes demandados.

La política de extracción de los embalses en un Plan de Riegos consiste en comparar el almacenamiento al primero de octubre más las aportaciones esperadas con cierto nivel de probabilidad, contra el volumen demandado. Sin embargo, este tipo de políticas puede dejar el embalse casi seco al final del año agrícola si el nivel de probabilidad de entradas a la presa seleccionado no es el adecuado (decisiones generalmente de tipo político), o si las aportaciones son escasas debido a un evento de sequía. Esta situación se verá agravada por el cambio climático, que predice mayores sequías en las zonas áridas y semiáridas, y un aumento significativo en la precipitación en las zonas húmedas, que provocaría daños aguas abajo por derrame de las presas, Figura 10.

Los riesgos asociados a la gestión de recursos hídricos en los distritos de riego pueden ser de varios tipos. Cuando se presentan eventos de sequía hidrológica que no permiten suplir la demanda de agua y cuando existen precipitaciones extraordinarias que provocan la entrada de grandes volúmenes de agua a los embalses que generan derrames en las presas; estos derrames pueden causar daños importantes por inundaciones aguas abajo de las presas.

Política de operación de presas

Los operadores de embalses necesitan saber cuánta agua extraer y cuándo. Los embalses diseñados para satisfacer las demandas de suministro de agua, recreación, energía hidroeléctrica, medio ambiente y / o control de inundaciones, deben operarse de manera que satisfagan esas demandas de la manera más confiable y efectiva.



Figura 10. Embalse de la presa Adolfo Ruz Cortines (Mocúzari) con volumen almacenado de 35.3 hm³ en abril 24 de 2018.

Dado que las entradas futuras o los volúmenes de almacenamiento son inciertos, el problema es determinar la mejor extracción del embalse para una variedad de posibles entradas y condiciones de almacenamiento. La regla o política de operación de un embalse o sistema de embalses, es el criterio que define cómo debe usarse el agua, en función del agua almacenada en cierto período, de las demandas y probables aportaciones. Estas reglas se diseñan para optimizar ciertos objetivos y criterios de evaluación.

Con fines ilustrativos en la Figura 11 se presenta la Regla Estándar de Operación, la cual establece que si el volumen almacenado al inicio del período (Alm) más las aportaciones probables a la presa (Ap) es inferior a la demanda, se extrae toda el agua de la presa. En caso de que $Alm + Ap$ sea superior a la demanda se extrae el volumen demandado y cuando las aportaciones en el período más el almacenamiento inicial superen la capacidad de la presa, se cumple la demanda y se desfoga el volumen excedente. Esta regla generalmente no se sigue al pie de la letra, ya que los operadores preferirán guardar volúmenes para períodos posteriores en época de déficits, en lugar de extraer la totalidad del volumen. Por otro lado, las demandas agrícolas varían

año con año debido a la preferencia de los usuarios en los cultivos a establecer, dadas las condiciones de mercado y precio de los productos. Sin embargo, es muy útil para describir una regla o política de operación.

En la práctica, las políticas de operación de las presas muestran patrones que reflejan el manejo discrecional de los distritos de riego, Figura 12, por lo que esta situación tiene un riesgo moral alto que el mercado de seguros no lo tomaría.

Las reglas de operación pueden definirse mediante modelos de simulación de la operación de embalses, métodos de optimización o una combinación de ambos. Algunos ejemplos de métodos de optimización son la programación lineal, programación cuadrática, programación dinámica, etc.

Para el caso del seguro contra contingencias hidrológicas, se utilizará un método de optimización acoplado a un modelo de simulación, dadas las complejas demandas y configuraciones existentes en los distritos de riego. Las presas de los distritos de riego generalmente cuentan con plantas hidroeléctricas para la generación de energía y abastecen demandas de agua potable, además de abastecer de agua para riego de los cultivos.

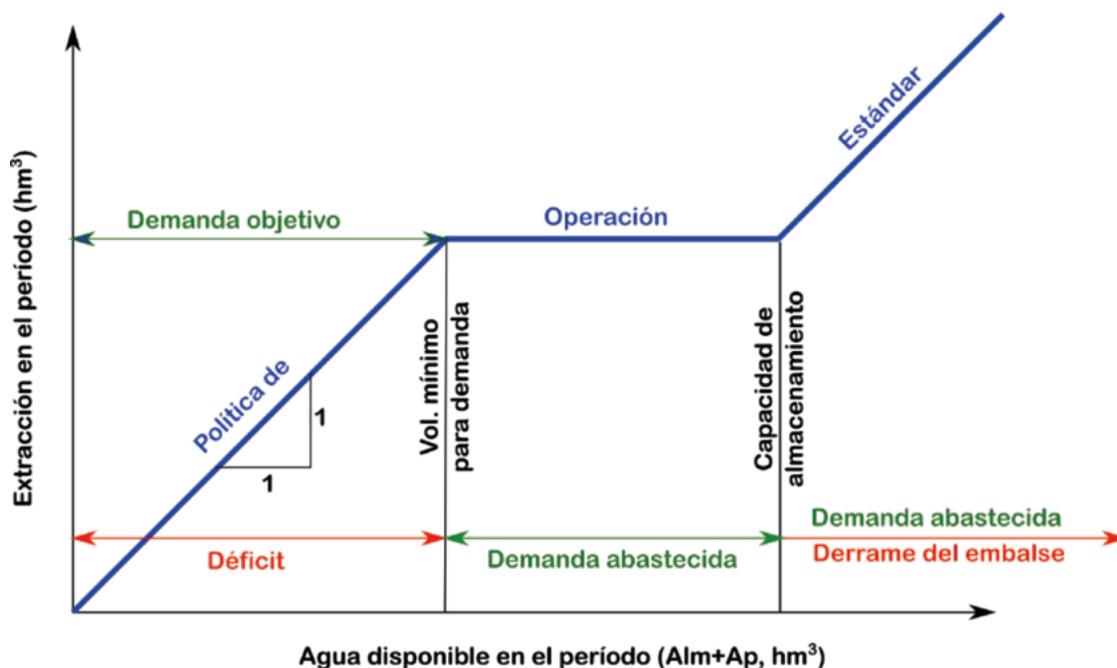


Figura 11. Regla estándar de operación.

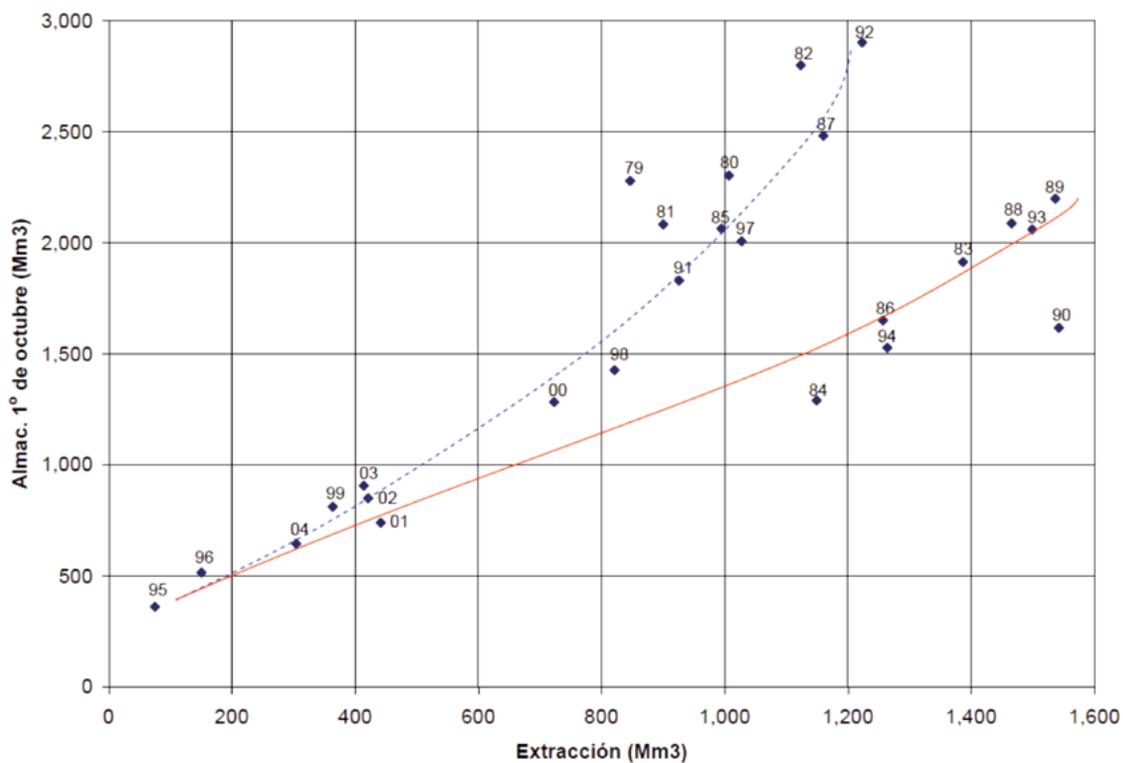


Figura 12. Política de operación para la Presa La Boquilla, Distrito de Riego 005, Delicias, Chihuahua. Fuente: Ortega-Gaucin et al. (2008).

Con el fin de contemplar la incertidumbre en las variables hidrológicas como escorrentía en cauces y las climatológicas como evaporación y precipitación, se deben ajustar modelos estocásticos a las series de tiempo históricas. Una vez ajustados los modelos estocásticos, se generarán trazas sintéticas de datos que servirán de datos de entrada al modelo de simulación.

Los modelos de simulación de los sistemas de recursos hidráulicos generan series temporales de las variables hidrológicas. Estos valores a su vez afectan los diferentes criterios de desempeño del sistema, cada uno relacionado con un interés específico y medido en sus unidades apropiadas. Es necesario contar con procesos para evaluar planes o políticas de operación alternativos.

Para la evaluación del desempeño del sistema en función de la política de operación propuesta, se pueden utilizar tres índices estadísticos: confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad (Tashimoto *et al.*, 1982; Loucks y Van Beek, 2005):

- **Confiabilidad:** La confiabilidad de cualquier serie de tiempo se puede definir como la cantidad de datos en un estado satisfactorio dividido por el número total de datos en la serie temporal. Suponiendo que los valores satisfactorios en la serie de tiempo X_t que contiene n valores, son aquellos mayores o iguales que algún umbral X^T , entonces:

$$\text{Confiabilidad}[X] = [\text{número de períodos } t: X_t \geq X^T] / n$$

Las medidas de confiabilidad no indican sobre la rapidez con que un sistema se recupera y vuelve a tener un valor satisfactorio, ni tampoco indica qué tan malo puede ser un valor insatisfactorio en caso de que ocurra. Bien puede ser que un sistema que falla a menudo, pero en cantidades insignificantes y por períodos cortos, sea

preferible que uno cuya confiabilidad es mucho mayor pero donde, cuando ocurre una falla, es probable que sea mucho más severa. Las medidas de elasticidad y vulnerabilidad pueden cuantificar estas características del sistema.

- **Resiliencia:** La resiliencia es la probabilidad de tener un valor satisfactorio en el período de tiempo $t+1$, dado un valor insatisfactorio en cualquier período de tiempo t . Se puede calcular como:

$$\text{Resiliencia}[X] = [\text{número de veces que un valor satisfactorio sigue a un valor insatisfactorio}] / [\text{número de veces que se produjo un valor insatisfactorio}]$$

- **Vulnerabilidad:** La vulnerabilidad es una medida del tamaño de las diferencias entre el valor umbral y los valores de las series de tiempo insatisfactorias. Claramente, esta es una medida probabilística. Algunos usan valores esperados, otros usan valores máximos observados y otros pueden asignar una probabilidad de excedencia a sus medidas de vulnerabilidad. Suponiendo que se usa una medida de vulnerabilidad de valor esperado, se puede calcular como:

$$\text{Vulnerabilidad}[X] = [\text{suma de los valores positivos de } (X^T - X_t)] / [\text{número de veces que se produjo un valor insatisfactorio}]$$

En la Figura 13 se presentan dos series temporales con igual media y desviación estándar, de hecho, la traza azul es una imagen espejo de la roja con pivote en la media. Sin embargo, el desempeño de las series es diferente si se aplican los índices de desempeño antes mencionados. La vulnerabilidad, la resiliencia y la confiabilidad son mayores en la serie azul que en la serie roja, el segundo fallo en el abastecimiento de la demanda en la serie azul es más grande que en la serie roja.

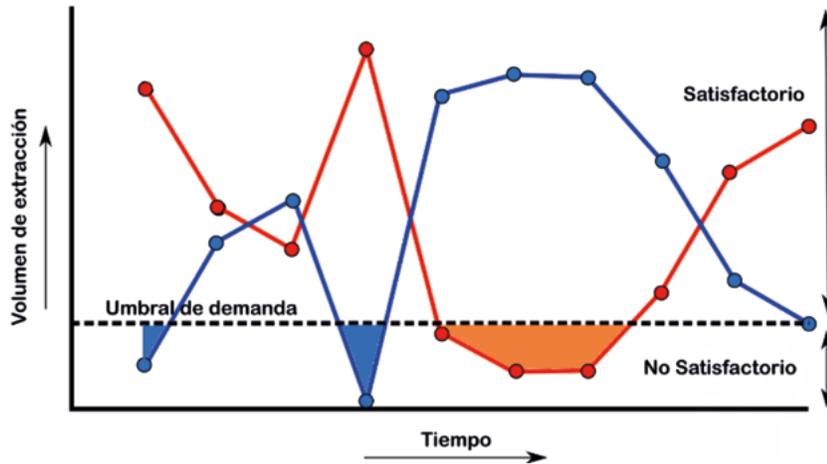


Figura 13. Comparación de series temporales. Fuente: adaptado de Loucks y Van Beek (2005).

Existen dos niveles que definen una política de operación: Cuanta agua se va a extraer en el año (Figura 14) y cómo se extraerá a escala mensual (Figura 15),

esta última operación se realiza utilizando trazas sintéticas, condicionadas a las aportaciones anuales.

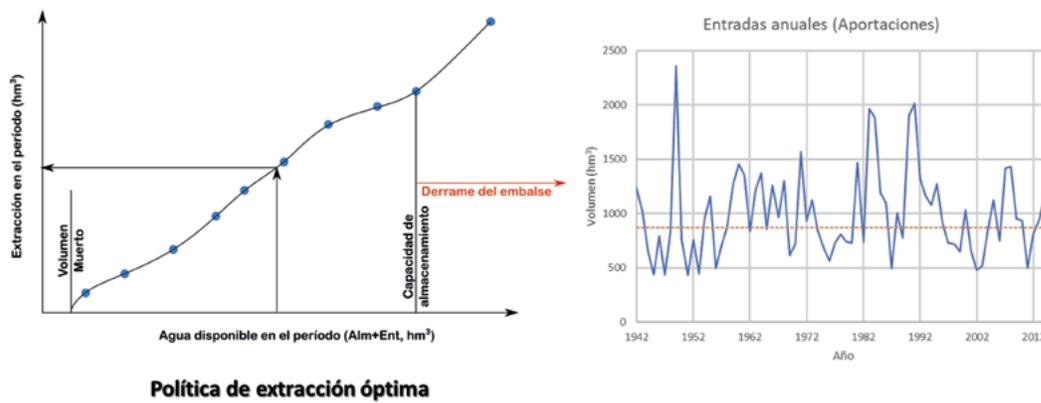


Figura 14. Política de extracción óptima en función de las aportaciones a la presa.

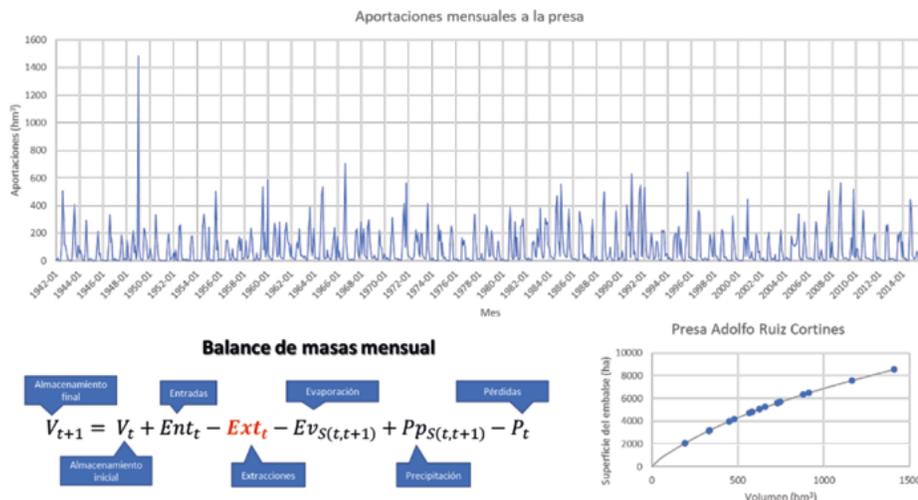


Figura 15. Simulación de la operación de la presa.



Por las características de los instrumentos financieros de gestión de riesgos en distritos de riego del

país se puede utilizar la siguiente función multiobjetivo en el modelo acoplado de optimización-simulación:

$$\text{Max } F(X_t, A_t) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n C_t + \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n R_t}{1 - \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n C_t} - \frac{1}{NF} \sum_{t=1}^{NF} V_t - \frac{1}{NP} \sum_{t=1}^{NP} P_t$$

X_t: Extracción de la presa para abastecer las demandas en el período t
X^T: Volumen de las demandas en el período t
A_t: Almacenamiento en el período t
V: Capacidad de almacenamiento al NAMO
S: Período t donde se abasteció completamente la demanda (Satisfactorio)
F: Período t donde no se abasteció completamente la demanda (Falla)
NF: Número de períodos con falla
NP: Número de períodos con derrame o desfogue
k: Factor de escala de los derrames (los volúmenes de derrame pueden ser considerables, por lo que es conveniente escalarlos para evitar sesgos en la optimización).
C: término de confiabilidad
R: término de resiliencia
V: término de vulnerabilidad
P: término de penalización por derrames o desfogues.

$$C_t = 1 \forall X_t \in S, C_t = 0 \forall X_t \in F$$

$$R_t = 1 \forall \{X_{t+1} \in S \mid X_t \in F\}, R_t = 0 \forall \text{ otro}$$

$$V_t = (X^T - X_t) \forall \{X_t < X^T\}, V_t = 0 \forall \{X_t \geq X^T\}$$

$$P_t = k * (A_t - V) \forall \{V < A_t\}, P_t = 0 \forall \{V \geq A_t\}$$

Consideraciones para el desarrollo de instrumentos financieros del agua

Un primer paso en el desarrollo de un mercado virtual del agua consiste en la estandarización de un instrumento financiero ligado a la disponibilidad de agua en un distrito de riego, mediante un esquema similar al de los seguros paramétricos.

Las condiciones de aleatoriedad en las entradas a las presas, la precipitación y la evapotranspiración, crean un ambiente propicio para el establecimiento de un seguro paramétrico, el cual estará definido por:

1. El objetivo del seguro es generar una póliza para el abastecimiento de la demanda de riego (volumen bruto a nivel presa).
2. Definición de índices de activación en función de políticas de operación de los embalses.
3. Las políticas de operación de referencia deben ser generadas a partir de un modelo de optimización acoplado a un modelo de simulación, en el que se minimice el riesgo de déficits en el abastecimiento de la demanda.
4. El modelo de optimización debe ser alimentado mediante trazas sintéticas de entradas a las presas, precipitación y evaporación, considerando las condiciones estocásticas

de los fenómenos, así como los cambios en los regímenes debido a alteraciones en las condiciones de las cuencas por intervención humana.

5. Cada año deberá correrse el modelo calibrado para definir volúmenes de extracción y almacenamientos deseables en los embalses.
6. Los costos de las primas anuales deben estar en función del nivel de riesgo que los operadores seleccionen al inicio del año agrícola o en su revisión en primavera: probabilidad de entradas a las presas y volumen bruto de extracción para abastecer la demanda.

Para la elección de los índices activadores o *triggers*, en cada inicio de año agrícola (1° de octubre) debe simularse el funcionamiento de los embalses en función del volumen almacenado y la política de extracción óptima. Los valores resultantes de volumen de extracción anual y su desagregado mensual en extracciones y volúmenes almacenados serán la base para la prima del seguro anual. Las desviaciones de estos valores incrementarán el valor de la prima, sólo si las extracciones son mayores que la recomendada por la política de operación. La Figura 16 muestra un ejemplo de posibles índices activadores en función de la distribución modelada de las aportaciones a una presa.

Mes	Almacenamiento (hm ³)	Extracciones (hm ³)	Aportaciones (hm ³)	Evaporación (hm ³)	Precipitación (hm ³)	Superficie (ha)	Evaporación (mm)	Precipitación (mm)
Oct	575.83	36.83	62.58	7.79	1.81	4769.7	161.4	37.6
Nov	595.60	181.5	29.39	5.05	0.56	4883.6	114.6	12.8
Dic	439.01	93.25	53.42	3.18	0.92	3924.7	84.0	24.3
Ene	396.92	154.79	47.59	2.93	0.67	3641.8	90.3	20.8
Feb	287.47	150.32	41.72	2.75	0.29	2845.5	115.0	12.3
Mar	176.41	149.31	27.79	2.32	0.09	1929.9	172.9	6.6
Abr	52.66	39.98	9.77	1.28	0.02	748.9	219.6	2.9
May	21.19	4.81	5.75	1.15	0.01	416.3	276.3	1.3
Jun	20.98	3.2	12.05	1.32	0.05	414.1	290.6	10.0
Jul	28.56	3.1	161.38	2.98	1.53	495.4	238.0	122.2
Ago	185.38	3.2	226.91	5.67	4.28	2008.4	198.2	149.4
Sep	407.70	3.1	149.05	7.41	3.96	3715.4	177.8	95.0
Oct	550.20	823.39	827.39	43.82	14.19	4619.2	2138.7	495.2

Posibles indicadores

Posibles indicadores

Figura 16. Ejemplo de posibles activadores de la detonación de pagos en una presa.

La política de operación óptima o de referencia deberá considerar en forma explícita los riesgos asociados a los escurrimientos (precipitaciones) en la cuenca para cada ciclo agrícola. Esto permite ligar los riesgos asociados con las precipitaciones con la

disponibilidad de agua para riego de los usuarios del sistema. En la Figura 17 se muestran las probabilidades asociadas a diferentes volúmenes de extracción asociadas a la política de operación óptima (o de referencia) para la presa Adolfo Ruiz Cortines (ARC).

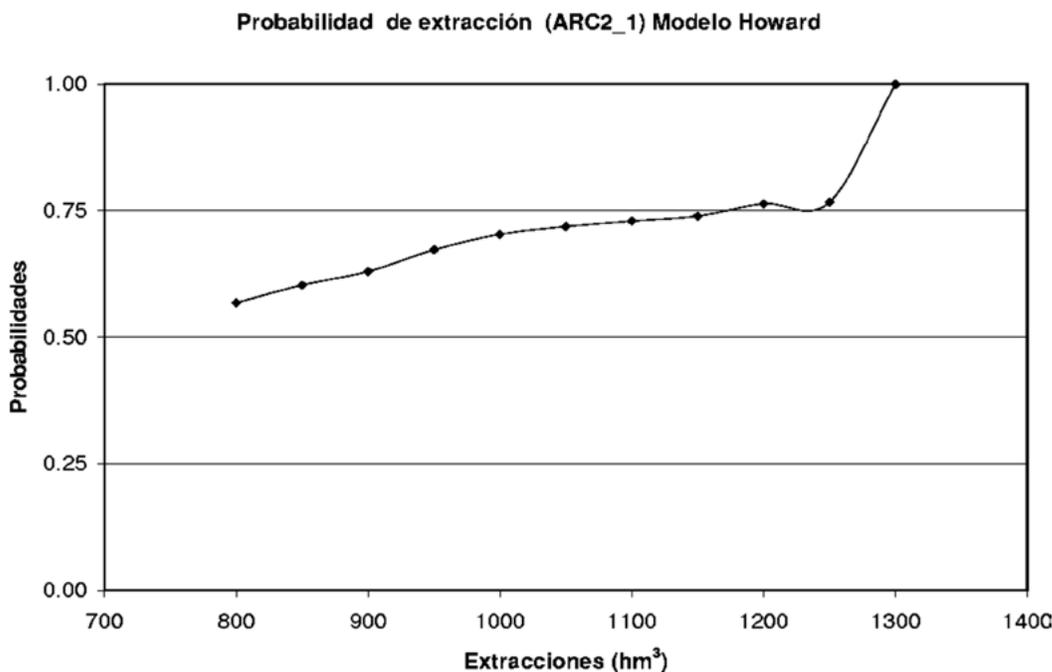


Figura 17. Probabilidades asociadas a las extracciones de la política de operación óptima para la presa ARC. Fuente: IMTA (2004).

De la Figura 17 se puede valorar los riesgos hidrometeorológicos asociados a un ciclo agrícola en particular, de tal forma que uno de los parámetros básicos de la tarificación de un seguro puede ser establecido. El otro parámetro es el asociado al valor del agua.

De acuerdo con la política de operación óptima o de referencia, para los diferentes niveles de riesgo de las precipitaciones, para cada ciclo agrícola (Otoño-Invierno y Primavera-Verano), y la programación del riego (patrón de cultivos y superficies), es necesario valorar el costo de oportunidad del agua (productividad marginal del agua) asociado a los valores de activación o *triggers* de disponibilidad del agua. Con esto se pueden establecer primas del seguro con un riesgo de base mínimo; aunque el esquema de derechos de agua en México implica un mismo valor para cualquier usuario, independiente de su cultivo.

En la Figura 18 se muestra un gráfico de la productividad marginal (promedio) del agua (PMA) establecida a nivel de un distrito de riego. El gráfico de la Figura 18 se genera en forma simple: se calcula el beneficio neto de cada cultivo en la zona de riego (\$/ha) y la eficiencia del uso del agua por cultivo (m^3/ha); estos datos son obtenidos de la programación de riegos que se realiza al inicio de cada ciclo agrícola y se ordenan los cultivos y sus volúmenes de agua de mayor beneficio neto (total = beneficio neto/ m^3 del cultivo) al menor. Realizada la ordenación económica de los cultivos, se calcula la productividad del agua (\$/ m^3) en forma descendente al calcular el valor del agua simplemente de la suma de los beneficios totales acumulados divididos entre los volúmenes de agua totales acumulados.

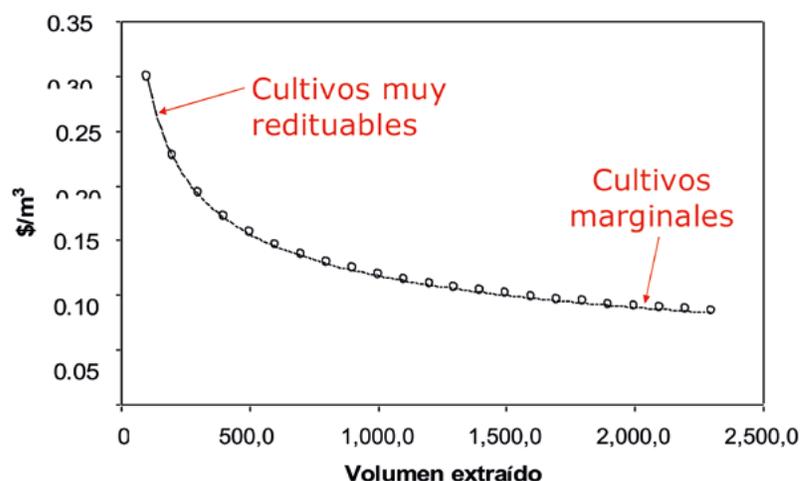


Figura 18. Productividad marginal del agua (promedio).

La valoración del agua puede ser hecha a nivel de DR (a través de la Sociedad de Responsabilidad Limitada o SRL – que es una organización de módulos), de asociación de usuarios (módulos de riego) y de organizaciones dentro de los módulos (fondos de aseguramiento y de otro tipo – submódulos), para considerar los costos asociados a las componentes espaciales y temporales de la distribución del recurso en el DR (esto es una consideración normal en la programación de los riegos por la autoridad del agua).

Desarrollado el producto de un seguro paramétrico, y su valoración económica, asociado a la disponibilidad del agua en una zona de riego, el siguiente paso es la generación de un mercado virtual del agua (Paz y Escamilla, 2002) que aproveche este tipo de instrumento

financiero estandarizado y con una estructura sólida de respaldo (seguro/reaseguro).

Un instrumento financiero simple es el uso de opciones tipo “call” (Hull, 2002) para operacionalizar los instrumentos del seguro desarrollados. La Figura 19 muestra en forma esquemática este tipo de instrumento, de los muchos posibles a desarrollar.

En la Figura 19, el valor de V2 del volumen de extracción V de una presa está asociado a un valor umbral donde los volúmenes de extracción superiores (dependientes de la aportación/escorrentía) no tienen un pago P adicional y representan el costo de la prima del seguro paramétrico o P2. Para volúmenes de extracciones inferiores a V2 hasta el valor umbral V1, los pagos P son proporcionales a los volúmenes, hasta un pago máximo P1.

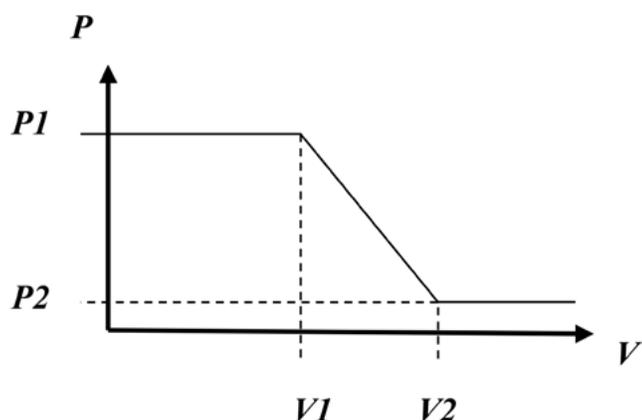


Figura 19. Esquema de un instrumento tipo opciones de los volúmenes de extracción.

La ventaja de los instrumentos financieros como el mostrado en la Figura 19 es que no requieren la ejecución de un contrato, estandarizado, de transferencia física del recurso agua (garantizado por el seguro) y pueden ser usados en el mercado de capitales o de derivados, como una forma de manejo financiero de recursos. Esto permite operacionalizar instrumentos del agua asociados al cambio climático en el mercado financiero, de tal forma que pueda ofrecer liquidez para su consolidación. Para esto, el mercado virtual del agua debe generalizarse a nivel mundial para que resulte atractivo para los agentes financieros, particularmente para los especuladores, requeridos por razones de liquidez de los mercados.

En el caso del operador del agua a nivel de presas (CONAGUA), este puede adquirir el seguro en la zona agrícola en operación y garantizar los volúmenes de extracción comprometidos, independientemente de lo que ocurra a nivel de las aportaciones a las presas. En vez de realizar un pago en volúmenes de extracción, el operador realiza un pago en términos monetarios de los volúmenes de agua, precio estandarizado y acordado previamente con los usuarios de riego. Si el operador no desea adquirir el seguro, se puede usar el mercado de derivados financieros (Geman, 1999) para colocar instrumentos de riesgo como las opciones *call* discutidas.

Minimización del riesgo moral asociado a los seguros paramétricos

Uno de los mayores obstáculos en la implementación de los seguros paramétricos para la cobertura de la

disponibilidad de agua en las presas de los distritos de riego es el establecimiento de la confianza en que las aportaciones de agua sean monitoreadas en forma independiente al operador. Para esto es necesario tener control sobre las salidas, los niveles de almacenamiento (volúmenes) y las entradas en los embalses y, por simulación, analizar los balances de agua para evaluar las aportaciones y volúmenes en la presa para ser usados en la política de operación de referencia y evaluar el estado de las extracciones para determinar si se cumplen o no los índices activadores de las pólizas de seguros.

Los mecanismos de supervisión y seguimiento de la operación de los seguros paramétricos, bajo la consideración de minimización del riesgo moral, deben basarse en (Figura 20):

- a). Mediciones de gastos de agua en las estaciones hidrométricas de las cuencas de las presas, establecidas por la CONAGUA. Estos datos deben ser usados para modelar el transporte de agua de la estación al vaso de almacenamiento y así determinar las aportaciones. Adicionalmente deben hacerse muestreos selectivos de sedimentos en suspensión y del contenido de carbono para establecer las relaciones gastos-sedimentos-carbono.
- b). Mediciones de las alturas de los niveles de las presas para determinar sus volúmenes mediante las relaciones altura-superficie-volumen de cada presa. Adicionalmente se estimarán las superficies de los niveles de agua a través de sensores remotos para estimar los volúmenes, usando relaciones altura-superficie-volumen de cada presa. Con esto es posible estimar los volúmenes de almacenamiento, pero no las aportaciones a la presa.
- c). Mediciones telemétricas de los gastos de salida de las presas. Con esta información y la del volumen de las presas se puede estimar las aportaciones y compararlas con las mediciones en las estaciones hidrométricas o la simulación inversa del vaso de almacenamiento.

En lo general, con los métodos independientes de medición y monitoreo es posible generar la confianza necesaria, para que las instituciones de gestión de riesgos puedan implementar los seguros paramétricos desarrollados.

Acciones y productos para la mitigación de riesgos y estrategias de adaptación

Uno de los problemas asociados a los instrumentos financieros de gestión de riesgos es que los usuarios de estos productos no tienen incentivos para modificar sus conductas, bajo la perspectiva de que el instrumento cubrirá sus pérdidas. Los eventos hidrometeorológicos extremos pueden ser aminorados con buenas prácticas de manejo ante estas condiciones adversas, por lo que, en conjunto con la implementación de los seguros paramétricos, es necesario desarrollar un esquema de asistencia satelital a nivel de productor. El servicio de asistencia debe consistir en los siguientes productos:

1. Detección de estrés hídrico en los cultivos, para la implementación de acciones para reducir esta condición y recuperar los rendimientos esperados.
2. Estimación de la evapotranspiración del cultivo, para calcular los requerimientos de riego (cuando y cuanto regar), para una mayor eficiencia en el uso de agua, con la reducción de las pérdidas en rendimiento ante una baja disponibilidad de agua.
3. Índice de nutrición de nitrógeno para recomendaciones de fertilización (cuando, donde y cuanto) para incrementar el rendimiento de los cultivos.
4. Índice de vigor de los cultivos para detección de zonas estresadas por plagas, falta de agua etc., dentro de las parcelas, para tomar acciones correctivas y preventivas para minimizar las pérdidas.

La implementación de la asistencia satelital permitirá mitigar riesgos climáticos, mediante la reducción de la dependencia de insumos externo, para generar un comportamiento orientado a mejorar la eficiencia de las actividades productivas, además de suscitar acciones de adaptación progresivas ante el cambio climático a través de buenas prácticas agrícolas. Con relación a la estructura de los seguros paramétricos,

deben analizarse opciones para integrar premios o descuentos en las primas de los seguros en función de buenas prácticas verificables con los productos de sensores remotos, a nivel de productores individuales o colectivos (p.ej. fondos de aseguramiento).

MODELACIÓN USANDO ENFOQUES DE HIDROLOGÍA DARWINIANA

Uno de los mayores retos en el diseño de seguros paramétricos como los propuestos, es la separación de la señal climática y antropogénica en las aportaciones a las presas, dado que los seguros cubrirán solo la parte climática y no la humana (riesgo moral). Adicionalmente, el problema de desarrollar modelos científicamente sólidos con la información disponible en México requiere de enfoques alternativos de ciencia, bajo la visión de implementación operativa de los desarrollos y de riesgos financieros a minimizar. En este contexto, la ciencia tiene un valor económico importante en la gestión de los riesgos a modelar.

Los enfoques clásicos de hidrología utilizan modelos mecanicistas (Newtonianos) (Arnold *et al.*, 1998; Beven *et al.*, 1980), donde el todo se fragmenta para modelarlo en forma independiente y después establecer relaciones entre las partes, esperando representar el todo. Además de problemas con relación a las interacciones de las partes, los requerimientos de parámetros para calibrar los modelos hacen esta práctica poco viable en México. La alternativa es el uso de modelos Darwinianos (“top down”) (Klemes, 1983; Sivapalan *et al.*, 2003; Littlewood *et al.*, 2003), donde se modela un proceso hidrológico como un todo y posteriormente se incrementa el nivel de complejidad del modelo en función de los intereses planteados.

El enfoque Darwiniano de modelación hidrológica parte de la delimitación de las fronteras factibles del proceso, para definir los límites de respuesta hidrológica. Esto es similar al planteamiento de los diagramas tipo Budyko (1974), Figura 22, para balances hídricos (promedios de años) bajo el supuesto de almacenamientos de agua nulos en el suelo (si hay extracciones de agua subterráneas se pueden incorporar estas variables en el modelo; O’Grady *et al.*, 2011), pero con una aproximación teórica basada en análisis dimensional sólido, denominado modelo de Fu (1981), el cual depende de un solo parámetro (w). Otros modelos no tienen un fundamento sólido y parten del absurdo de que dos líneas paralelas se juntan en un punto común, que por definición no es posible.

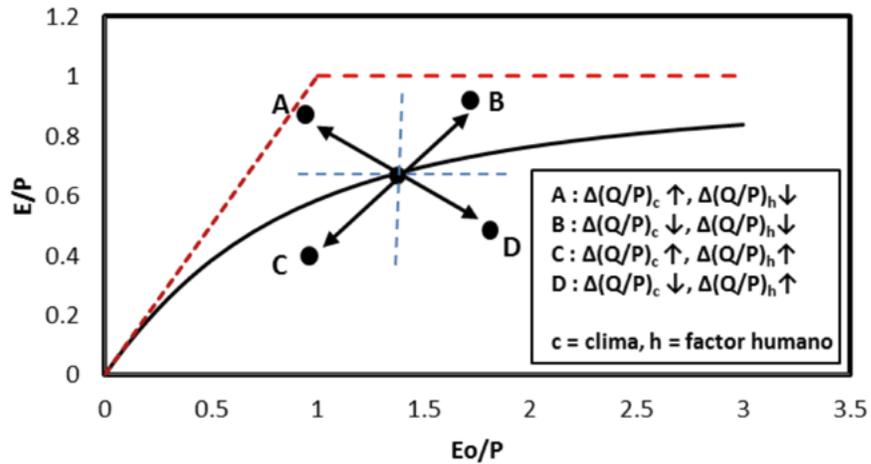


Figura 22. Patrones de cambio en el espacio $E_o/P - E/P$ (diagrama de Budyko) de cambios climáticos y de factores humanos. Fuente: adaptado de Wang y Hejazi (2012) y Renner *et al.* (2013), utilizando el modelo de Fu.

Un segundo paso o nivel consiste en expandir el modelo de promedios anuales (nivel superior) al caso anual, por medio de nuevas variables no consideradas en el nivel superior, tal como es el caso de los almacenamientos de agua en el suelo. Un tercer nivel consiste en desagregar la respuesta de la cuenca a nivel estacional (periodo de secas y de lluvias), para posteriormente disociarlo a nivel mensual para su uso en el modelo de optimización de la operación de las presas. En cada nivel de desagregación, de arriba hacia abajo, se incorporan variables que expliquen los balances, por lo que la modelación está fundamentada en los patrones observados en los datos y no en supuestos teóricos o empíricos. La integración de nuevas variables en el modelo hidrológico no implica nuevos requerimientos de datos, que generalmente no están disponibles, sino un proceso de estimación inversa en función de los patrones observados, facilitando el

uso de este enfoque de modelación ante escenarios de poca o nula información disponible.

Para desmezclar la información hidrológica en factores humanos y climáticos, aunque existen varias propuestas (Zhang *et al.*, 2007; Zheng *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2012; Xu *et al.* 2013), es posible usar el esquema de utilización del espacio del exceso de agua y exceso de energía (Tomer y Schilling, 2009; Renner y Bernhofer, 2012; Renner *et al.*, 2014), Figura 23, que permite analizar los procesos hidrológicos en la perspectiva de balances de agua y energía. Con la información únicamente de la respuesta hidrológica asociada al clima, esta consideración será utilizada en la simulación de trazas sintéticas para definir una política óptima de operación de los embalses, separando efectos climáticos de las actividades humanas que impactan en las cuencas.

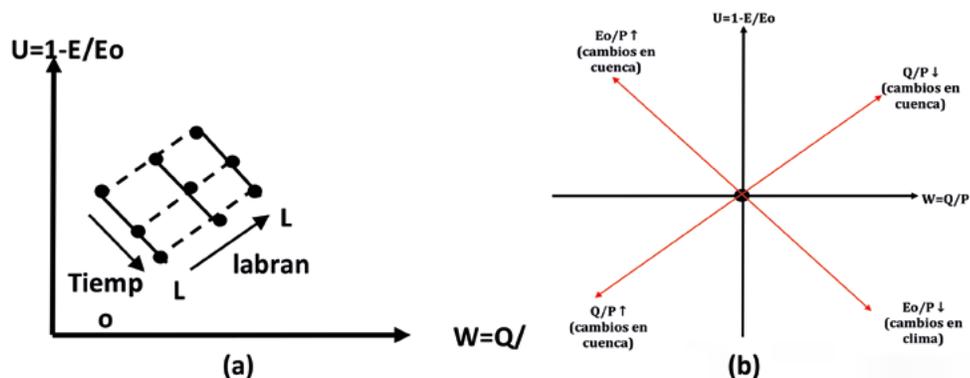


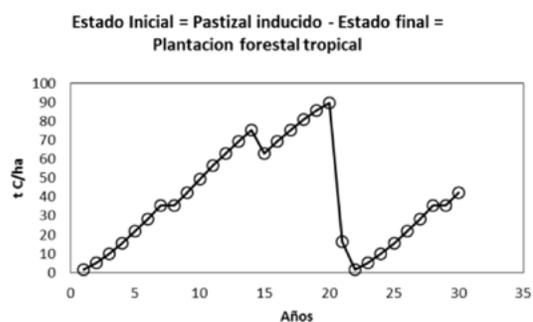
Figura 23. Separación de la señal climática de la del manejo/estado de la cuenca. (a) Esquemización del patrón observado por Tomer y Schilling (2009) en parcelas de cultivos con diferentes prácticas de conservación (LC = labranza de convencional y L0 = labranza cero) y (b) Esquemización del patrón de cambio por clima y por cambio en las características de las cuencas. Fuente: adaptado de Tomer y Schilling (2009) y Renner *et al.* (2012).

Para poder asociar la respuesta hidrológica integrada de la cuenca a los procesos locales internos en la misma, es necesario el acoplamiento de un modelo local espacialmente explícito con la interconectividad hidrológica (Bracken y Croke, 2007; Jencso *et al.*, 2009; Jencso y McGlynn, 2011; Larsen *et al.*, 2012; PMC, 2015c) de las acciones locales a la red de cauces de la cuenca y su tránsito hasta el embalse de la cuenca. Con este objetivo se pueden utilizar los modelos de estados y transiciones (METs) (Stringham *et al.*, 2001), tiempos de paso anuales, desarrollados por el Programa Mexicano del Carbono (Covaleda *et al.*, 2012a y b, 2013 y 2016; Paz y Covaleda 2014; Paz *et al.*, 2012 y 2014; PMC, 2015a y b), los cuales pueden ser parametrizados en forma simple utilizando información disponible en México. La Figura 24 muestra un ejemplo del modelo para un cambio de uso del suelo, donde la dinámica del carbono es modelada, junto con los cambios en la cobertura aérea de la vegetación, la cual modifica el coeficiente de escurrimiento (Q/P). Los patrones hidrológicos de los METs están fundamentados en los meta-análisis globales (Bosch y Hewlett, 1982; Hornbeck *et al.*, 1993; Sahin y Hall, 1996; Stednick, 1996; Brown *et al.*, 2005).

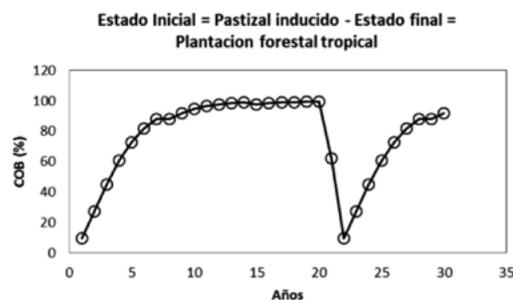
Para poder realizar los ejercicios de modelación hidrológica, y de flujos de carbono, es necesario el desarrollo de una geobase multitemporal a escala nacional usando una malla con dimensiones de 250 m x 250 m, Figura 25. Esta geobase deberá contener lo siguiente:

1. Identificación de la cuenca que corresponde a cada celda (píxel), además de datos administrativos o de contexto (municipio, AGEB, etc.).
2. Datos meteorológicos necesarios para los procesos de modelación: precipitación y evapotranspiración potencial, estimada en función de la temperatura (Hamon, 1963; Hargreaves y Samani, 1985; Hargreaves y Allen, 2003).
3. Datos de uso del suelo y vegetación multitemporales a escala 1:50 000 (clases *sensu* INEGI).
4. Datos de carbono en los almacenes principales de los usos del suelo y vegetación.
5. Índices o factores de interconexión hidrológica de la celda a los cauces de la cuenca y el embalse.

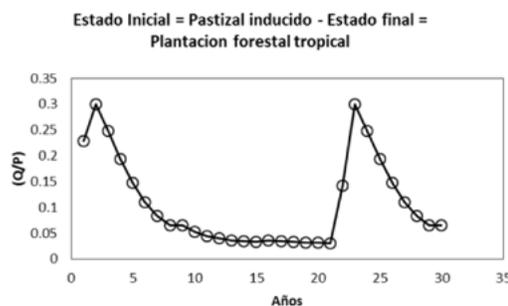
6. Datos de suelos (textura y materia orgánica), además de propiedades hidráulicas (funciones de pedotransferencia).
7. Datos de la geomorfometría y complejidad topográfica de la celda.
8. Datos de índices o variables biofísicas estimadas usando sensores remotos (sensor MODIS o similar).
9. Otros datos que se requieran en las revisiones de la modelación hidrológica.



Dinámica del carbono (= 0.5 de la biomasa aérea seca) de un MET.



Dinámica de la cobertura aérea de la vegetación de un MET.



Dinámica del coeficiente de escurrimiento de un MET.

Figura 24. Ejemplo de aplicación de un modelo de estados y transiciones (MET).

Toda la información de la geobase deberá tener asociada una temporalidad múltiple (p.ej. días, meses, estaciones, años, promedios de años) para poder utilizar el enfoque de hidrología Darwiniana.

Este esquema de sistematización de insumos orientados a la modelación hidrológica, a través de un sistema de información geográfica, permitirá la expansión a bajo costo de los desarrollos locales hacia la escala nacional.

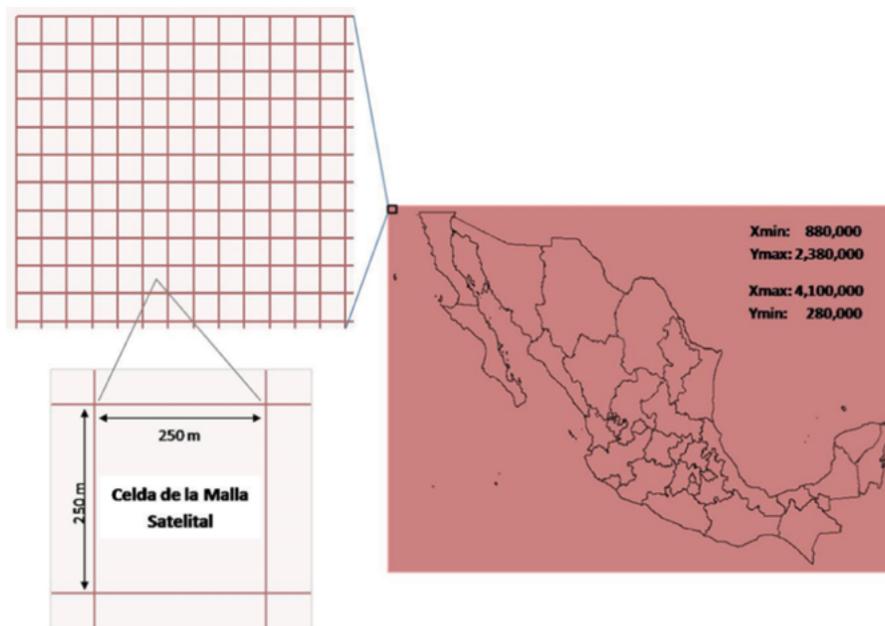


Figura 25. Malla nacional de la geobase multitemporal planteada.

COMENTARIOS FINALES

La propuesta de desarrollo de un mercado virtual del agua en México, como un instrumento financiero de mitigación y adaptación al cambio climático, fundamentada en paradigmas innovadores de ciencia, permite contar con productos de gestión de riesgos climáticos que optimicen los recursos financieros del país; además de generar cambios de actitudes en el uso del agua a través de incentivos financieros para una mejor gestión hídrica. Para la implementación del mercado virtual del agua es necesario el desarrollo de sus elementos constitutivos, lo cual puede realizarse en forma progresiva a través de pilotos en distritos de riego representativos en el país.

LITERATURA CITADA

- ADPC. 2004. Environmental degradation and disaster risk. Issue Paper prepared by Asian Disaster Preparedness Center for Embassy of Sweden/Sida Bangkok, Bangkok, Thailand. 39 p.
- AGROASEMEX. 2005. Administración de riesgos agropecuarios. Manuales para el Fortalecimiento de los Fondos de Aseguramiento Agropecuario. AGROASEMEX, S.A. Querétaro, México. 133 p.
- AGROASEMEX. 2006a. La experiencia mexicana en el desarrollo y operación de seguros paramétricos aplicados a la agricultura, AGROASEMEX, S.A. Querétaro, México. 59 p.
- AGROASEMEX. 2006b. La experiencia mexicana en el desarrollo y operación de seguros paramétricos orientados a la ganadería. AGROASEMEX, S.A. Querétaro, México. 57 p.
- Andersen, T. J. 2007. Utilización de técnicas de financiamiento del riesgo para gestionar las exposiciones económicas de amenazas naturales. Series de Informes Técnicos del Departamento de Desarrollo Sostenible ENV-147. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington, D.C. 62 p.
- Arias, D. and K. Covarrubias. 2006. Agricultural insurance in Mesoamerica: an opportunity to deepen rural financial markets. Inter-American Development Bank, Economic and Sector Study Series, RE2-06-006. 60 p.

- Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model Development. *Journal of the American Water Resources Association* 34:73-89.
- Beven, K. J., R. Warren and J. Zaoui. 1980. SHE: towards a methodology for physically based distributed forecasting in hydrology. IAHS Pub. No. 129. Walling Ford, UK.
- Bosch, J. M. and J. D. Hewlett. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55:3-23.
- Bracken, L and J. Croke. 2007. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. *Hydrological Process* 21:1749-1763.
- Brown, A. E., L. Zhang, T. A. McMahon, A.W. Western and R. A. Vertessy. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology* 310:28-61.
- Buchanan, J. 1975. The Samaritan's dilemma. In: Phelps, E. S. (ed.). *Altruism, Morality and Economic Theory*. Russell Sage Foundations, New York. 232 p.
- Budyko, M. I. 1974. *Climate and life*. Academic Press, Orlando, Florida. 508 p.
- Chen, Z., Y. Chen and B. Li. 2012. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff Kaidu River Basin in arid region of northwest China. *Theor. Appl. Climatol* 111:537-545. Doi:10.1007/s00704-012-0680-4.
- Coate, S. 1995. Altruism, the Samaritan's dilemma, and government transfer policy. *American Economic Review* 5:46-57.
- CONAGUA. 2015. *Estadísticas del Agua en México, Edición 2015*. Comisión Nacional del Agua. México
- CONAGUA. 2016. *Estadísticas del Agua en México, Edición 2016*. Comisión Nacional del Agua. México.
- Conde, C., M. Vinocur, C. Guy, R. Seiler and F. Estrada. 2006. Climatic threat spaces as a tool to assess current and future climate risks: case studies in Mexico and Argentina. AIACC working Paper No. 30. The AIACC project Office, Washington, D.C. 54 p.
- Covaleda, S., F. Paz y B. de Jong. 2012a. Modelo genérico de estados y transiciones para los cambios en los almacenes de carbono en ecosistemas templados de Chiapas. pp. 374-381. En: Paz, F. y R. Cuevas (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-715-085-5.
- Covaleda, S., F. Paz y B. de Jong. 2012. Modelos de estados y transiciones: una herramienta para la planificación de estrategias REDD+. pp:752-758. En: Paz, F. y R. Cuevas (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.
- Covaleda, C., F. Paz y B. de Jong. 2012. Parametrización de modelos de estados y transiciones para el carbono y caracterización de la incertidumbre. pp. 29-34. En: Paz, F., M. Bazan y V. Saynes (eds.). *Dinámica del Carbono en el Suelo 2012*. Serie Avances Temáticos del Ciclo del Carbono y sus Interacciones. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-96490-05.
- Covaleda, S., F. Paz y A. Ranero. 2016. Carbono edáfico en Chiapas: Planteamiento de políticas públicas de mitigación de emisiones. *Terra Latinoamericana* 34:97-112.
- Crespo, J. and J. Hlouskova. 2004. Natural disasters as creative destruction: evidence from developing countries. Preliminary Version. International Institute for Applied Systems Analysis. Laxenberg, Austria. 17 p.
- De Wit, M. and J. Stankiewicz. 2006. Changes in surface water supply across Africa with predicted climate change. *Science* 311:1917-1921.
- Delgado-Balbuena, J., E. A. Yépez, G. Ángeles-Pérez, C. Aguirre-Gutiérrez, T. Arredondo, F. Ayala-Niño, S.H. Bullock, A.E. Castellanos, A. Cueva, B. Figueroa-Espinoza, J. Garatuzapayán, C. Hinojo-Hinojo, Y. Maya-Delgado, L. Méndez-Barroso, W. Oechel, F. Paz-Pellat, E. R. Pérez-Ruiz, J. C. Rodríguez, N. E. Rojas-Robles, Z. M. Sánchez-Mejía, J. Uuh-Sonda, R. Vargas, V. S. Verduzco, E. R. Vivoni y C. Watts. 2018. Flujos anuales de carbono en ecosistemas terrestres de México. pp. 90-99. En: Paz, F., A. Velázquez y M. Rojo (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018*. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-96490-6-7.
- Delgado-Balbuena, J., E. A. Yépez, F. Paz-Pellat, G. Ángeles-Pérez, M. S. Alvarado-Barrientos, S. H. Bullock, A. E. Castellanos, T. Arredondo, B. Figueroa-Espinoza, J. Garatuzapayán, E. González-del castillo, E. González-Sosa, Y. Maya-Delgado, J. C. Rodríguez, R. Vargas, E. R. Vivoni, C. J. Watts, C. Aguirre-Gutiérrez, J. Arellano-Verdejo, F. Ayala-Niño, C. Coronel, A. Cueva, A. Guevara-Escobar, C. Hinojo-Hinojo, P.U.K. Tha, H.E. Lazcano, C. Lizárraga-Celaya, J. M. Madrigal-Gómez, L. A. Méndez-Barroso, W. Oechel, E. R. Pérez-Ruiz, M. Quesada-Avenidaño, C. A. Robles-Zazueta, N. E. Rojas-Robles, M. Sánchez-Hidalgo, Z. M. Sánchez-Mejía, T. Tarin, E. Troyo-Diéguez, J. Uuh-Sonda, M. L. Vargas-Terminel, M. G. Vega-Puga y V. S. Verduzco. 2019. Capítulo 25: Flujos verticales de carbono en ecosistemas terrestres. pp. 605-625. En: Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez. *Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde*. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México. ISBN 978-607-96490-7-4.

- Dischel, R. (ed.). 2002. *Climate Risk and the Weather Market*. Risk Books, London. 325 p.
- Ehbe, M., H. Eakin, R. Seiler, M. Vinocur, C. Avila and C. Marutto. 2006. Local perspectives on adaptation to climate change: lessons from Mexico and Argentina. AIACC Working Paper No. 39. The International START Secretariat. Washington, D.C. 39 p.
- Freeman, P. K. and H. Kunreuther. 2003. Managing environmental risk through insurance. pp. 159-18. *In*: Folmer, H. and T. Tietenberg (eds.), *International Yearbook of Environmental and Resource Economics*. Edward Elgar Publishing Ltd. London.
- Fu, B. P. 1981. On the calculation of the evaporation from land Surface (en Chino). *Sci. Atmos. Sin.* 51:23-31.
- Gay, C., M. Hernández, J. Jiménez, J. Lezama, V. Magaña, T. Morales and S. Orozco. 2004. Evaluation of climatic forecasts of rainfall for the Tlaxcala state (Mexico): 1998-2002. *Atmósfera* 17(3):127-156.
- Geman, H. (ed.). 1999. *Insurance and Weather Derivatives: from Exotic Options to Exotic Underlyings*. Risk Books. London. 213 p.
- Guy, C. 2000. Managing the financial impacts of natural disasters losses in Mexico: government options for risk financing and risk transfer. Latin America and the Caribbean Region. The World Bank. Washington, D.C.
- Hamon, W. R. 1963. Computation of direct runoff amount from storm rainfall. *Intl. Assoc. Scientific Hydrol. Publ.* 63:52-62.
- Hargreaves, G. H. and R. G. Allen, 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129:53-63.
- Hargreaves, G. H. and Z. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration for temperature. *Appl. Eng. Agric.* 1:96-99.
- Harris, R. L. and S. Robinson. 2001. Economy-wide effects of El Niño/Southern Oscillation (ENSO) in Mexico and the role of improved forecasting and technological change. Discussion Paper No, 83. Trade and Macroeconomics Division, International Food Policy Research Institute. Washington, D.C. 78 p.
- Hornbeck, J. W., M. B. Adams, E. S. Corbett, E. S. Verry and J. A. Lynch. 1993. Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northeastern USA. *Journal of Hydrology* 150:323-344.
- Hoyois, P., R. Below, J. M. Dcheuren and D. Guha-Sapir. 2006. Annual disaster statistical review: numbers and trends 2006. Centre for Research on Epidemiology of Disasters (CRED). School of Public Health. Catholic University of Louvain. Brussels, Belgium. 54 p.
- Hull, J. C. 2002. *Fundamentals of futures and options markets*. Prentice Hall. Upper Saddle River. 491 p.
- IMTA. 2004. Estudio para el manejo optimo del agua superficial y subterránea y exploración de escenarios en la cuenca del río Mayo. Informe Final preparado para la Comisión Estatal del Agua. Gobierno del Estado de Sonora. México.
- Hulme, M. and N. Sheard. 1999. *Climate Change Scenarios for Mesoamerica*. Climate Research Unit. University of East Anglia. Norwich, United Kingdom. 80 p.
- INE-SEMARNAT. 2006. México: Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. México. 212 p.
- INECC y SEMARNAT. 2012. Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Inecc/Semarnat. D. F., México.
- INECC y SEMARNAT. 2015. Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Inecc/Semarnat. D. F., México.
- IPCC. 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. New York, NY. 594 p.
- IPCC. 2014. *Technical Summary*. *In*: Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J. C. Minx (Eds.). *Climate Change. 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jencso, K and B. L. McGlynn. 2011. Hierarchical controls on runoff generation: Topographically driven hydrologic connectivity, geology and vegetation. *Water Resources Research* 47:1-16.
- Jencso, K., B. L. McGlynn, M. Gooseff, S. Wondzell, K. Bencala, K and L. Marshal. 2009. Hydrologic connectivity between landscapes and stream: Transferring reach and plot-scale understanding to the catchment scale 45:1-16.
- Johansson, R. C. 1998. *Pricing Irrigation Water: A Literature Survey*. The World Bank. Washington, D.C. 80 p.
- Klemes, V. 1983. Conceptualization and scale in hydrology. *J. Hydrol.* 65:1-23.
- Kreimer, A., M. Arnold, C. Barhar, P. Freeman, R. Gilbert, F. Krimgold, R. Lester, J. D. Pillner and T. Vogt. 1999. Managing disaster risk in Mexico: market incentives for mitigation investment. Disaster Risk Management Series, Disaster Management facility. The World Bank, Washington, D.C. 57 p.
- Larsen, L., J. Choi, M. Nungesser and J. Harvey. 2012. Directional connectivity in hydrology and ecology. *ESA* 22:2204-2220.
- Littlewood, I. G., B. F. W. Croke, A. J. Jakeman and M. Sivapalan. 2003. The role of 'top-down' modelling for Prediction in Ungauged Basins (PUB). *Hydrological Processes*. 17:1673-

- 1679.
- Liverman, D. M. 2000. Adaptation to drought in Mexico. pp. 35-45. In: Whilhite, D. (ed.). *Drought: A Global Assessment*. Rutledge, New York. Volume 3, Chapter 31.
- Loucks, D. P. and E. Van Beel. 2005. *Water Resources Systems Planning and Management. An introduction to methods, models and applications*. UNESCO, Paris
- Magaña, V. O. (ed.). 1999. *Los Impactos de El Niño en México*. Secretaría de Gobernación. México, D.F.
- Magaña, V. O. 2005. Fomento de las capacidades para la etapa II de adaptación al cambio climático en Centroamérica, México y Cuba. Estudio de caso en México: Tlaxcala. Análisis de la vulnerabilidad actual, Informe de Avance de Trabajo, Proyecto RLA/01/G31/A/1G/99, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Fondo Global del Ambiente. 94 p.
- Martin, S. W., B. J. Barnett and K. H. Coble. 2001. Developing and pricing precipitation insurance. *Journal of Agricultural and Resource Economics* 26:261-274.
- Morales, R., V. Magaña, C. Millán y J. L. Pérez. 2003. Efectos del calentamiento global en la disponibilidad de los recursos hidráulicos de México. Proyecto HC-0112. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. 151 p.
- Muller, A. and A. Grande. 2000. Weather derivatives: a risk management tool for weather-sensitive industries, *The Geneva Papers on Risk and Insurance* 25:273-287.
- O'Grady, A. P., J. L. Carter and J. Bruce. 2011. Can we predict groundwater discharge from terrestrial ecosystems using existing eco-hydrological concepts? *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15:3731-3739.
- Ortega-Gaucin, D., E. Palacios, E. Mejía y A. Exebio. 2008. Análisis de las políticas de extracción de agua y determinación de reglas de operación para las presas de almacenamiento La Boquilla y Fco. I. Madero. IV Seminario Internacional de Uso Integral del Agua. Jiutepec, México.
- Paz, F., M. Bolaños, F. Pascual, J. Escamilla, M. Cuesta y J. I. Zúñiga. 2018a. Experiencia Mexicana en el diseño de seguros ganaderos paramétricos satelitales de tipo catastrófico: bases conceptuales y teóricas. *Terra Latinoamericana* 36:131-140.
- Paz, F., M. Bolaños, F. Pascual, J. Escamilla, M. Cuesta y J. I. Zúñiga. 2018b. Experiencia Mexicana en el diseño de seguros ganaderos paramétricos satelitales de tipo catastrófico: implementación operacional en México. *Terra Latinoamericana* 36:141-152.
- Paz, F., S. Covalada, A. Ranero, X. Ugarte, E. Esquivel, M. I. Marín, R. Cuevas, B. de Jong y J. D. Etchevers. 2012. Estudio de Factibilidad para el mecanismo REDD+ en Chiapas. http://www.pmc carbono.org/pmc/proyectos/CI_Factibilidad_REDD+.php
- Paz, F. y S. Covalada. 2014. Modelos de estados y transiciones (METs) compuestos para la modelación anual de la dinámica de carbono. pp: 301-307. En: Paz, F. y J. Wong (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-96490-2-9.
- Paz, F., S. Covalada, J. Etchevers y B. de Jong. 2014. Modelos de la dinámica temporal del carbono orgánico de los suelos asociada a cambios de uso del suelo en ecosistemas forestales. En: Paz, F. y J. Wong (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-96490-2-9. pp. 285-290.
- Paz, F. y J. Escamilla. 2008. Adaptación al cambio climático en la agricultura de riego: mercado virtual del agua, una estrategia financiera. pp. 164-167. En: Pereira, L. S., F. B. Victoria, P. Paredes, M. García, E. Palacios y A. Torecillas (eds.). *Tecnologías para o Uso Sestentável da Agua em Regadió*. CEER – Centro de Engenharia dos Biosistemas. Edicoes Colibri. Lisboa, Portugal.
- Paz, F. y B. de Jong. 2012. Desarrollo de una estrategia de mapeo del carbono en ecosistemas terrestres usando fusión de información cuantitativa y semi-cuantitativa en campo bajo el principio de conservación de la incertidumbre. pp. 275-280. En: Paz, F. y R. Cuevas (eds.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-715-085-5.
- Paz-Pellat, F. y V. Salas-Aguilar. 2019. Base de datos de volúmenes de agua y sedimento en subcuencas costeras de México. *Elementos para Políticas Públicas* 3:41-50.
- Paz-Pellat, F., V. Salas-Aguilar, V. M. Romero-Benítez, J. D. Etchevers-Barra, C. I. Hidalgo-Moreno, M. Bolaños-González y A. S. Velázquez-Rodríguez. 2019. Capítulo 14: Flujos laterales tierra-océano. pp. 263-284. En: Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez. *Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde*. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México. ISBN 978-607-96490-7-4.
- Paz, F., E. Castillo, J. C. Cabrera y E. Medrano. 2018. Base de datos nacional de índices de vegetación: resolución especial de 250 m y resolución temporal de 10 días. *Elementos para Políticas Públicas* 2:109-124.
- Paz, F., E. Palacios, M. Bolaños, A. Cano, A. Zarco, F. Pascual, L. A. Palacios y M. Martínez. 2006. Design of a country scale livestock insurance in grasslands using AVHRR sensor. pp. 683-685. In: Sobrino, J. A. (ed). *Second Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*. Universitat de Valencia, Valencia, Spain.

- PMC. 2015a. Informe: Paradigma de armonización de los METS con la relación precipitación – escurrimiento – erosión – transporte de sedimentos. Estudio de Factibilidad Técnica para el Pago de Bonos de Carbono en el Estado de México (RETUS con BASES EDOMEX). Coordinador: Fernando Paz-Pellat. Colaboradores: Fernando Paz-Pellat y Alma S. Velázquez-Rodríguez. Texcoco, Estado de México. 107 p.
- PMC. 2015b. Informe: Parametrización de los Modelos de Estados y Transiciones a escala Municipal. Estudio de Factibilidad Técnica para el Pago de Bonos de Carbono en el Estado de México (RETUS con BASES EDOMEX). Coordinador: Fernando Paz-Pellat. Colaborador: Marcos Casiano-Domínguez. Texcoco, Estado de México. 72 p.
- PMC. 2015c. Modelo de Interconectividad Hidrológica a Nivel de Cuencas en el Estado de México. Estudio de Factibilidad Técnica para el Pago de Bonos de Carbono en el Estado de México (RETUS con BASES EDOMEX). Coordinador: Fernando Paz-Pellat. Colaboradores: Víctor Manuel Salas-Aguilar. Texcoco, Estado de México. 32 p.
- Rasmussen, T. N. 2004. Macroeconomic implications of natural disasters in the Caribbean. Working Paper WP/04/224. International Monetary Fund. 24 p.
- Rejda, G. E. 2001. Principles of risk management and insurance. Addison Wesley Longman. Boston, MA.
- Renner, M. and C. Bernhofer. 2012. Applying simple water-energy balance frameworks to predict the climate sensitivity of streamflow over the continental United States. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16:2531–2546.
- Renner, M., R. Seppelt and C. Bernhofer. 2013. Evaluation of water-energy balance frameworks to predict the sensitivity of streamflow to climate change. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16:1419-1433.
- Renner, M., K. Brust, K. Schwärzel, M. Volk and C. Bernhofer. 2014. Separating the effects of changes in land cover and climate: a hydro-meteorological analysis of the past 60 yr in Saxony, Germany. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18:389–405.
- Sahin, V. and M. J. Hall. 1996. The effects of afforestation and deforestation on water yields. *J. Hydrol.* 178:293-309.
- Salas-Aguilar, V. M. y F. Paz-Pellat. 2017. Desarrollo de una base de datos geomorfológica nacional. *Elementos para Políticas Públicas* 1:173-182.
- Salas-Aguilar, V. M. y F. Paz-Pellat. 2018.a Base de datos para estimación de sedimentos en subcuencas de México. *Elementos para Políticas Públicas* 2:85-92.
- Salas-Aguilar, V. M. y F. Paz-Pellat. 2018b. Desarrollo de una base de datos climática nacional anual, 1989-2012: resolución 250 m. *Elementos para Políticas Públicas* 2:19-32.
- Saldaña, S. O. 2006. Stakeholders views in reducing rural vulnerability to natural disasters in southern Mexico: hazard exposure, coping and adaptive capacity. Advanced Institute on Vulnerability to Global Environmental Change. International Institute for Applied systems Analysis. Risk and Vulnerability Program. Luxemburg, Austria. 65 p.
- Seigel, R., M. Ting, I. Held, Y. Kushnir, J. Lu, G. Vecchi, H. P. Huang, A. Leetma, N. C. Lau, C. Li, J. Velez and N. Naik. 2007. Model projections of an imminent transition to a more arid climate in Southwestern North America. *Science* 316:1181-1184
- SEMARNAP. 2012. Bases para una estrategia de desarrollo bajo en emisiones. Inecc-Semarnat. D. F., México.
- Simpson, L. and K. Ringskog. 1997. Water Markets in the Americas. *Directions in Development*. The World Bank. Washington, D.C. 52 p.
- Sivapalan, M., G. Blöschl, L. Zhang and R. Vertessy. 2003. Downward approach to hydrological prediction. *Hydrol. Processes* 17:2101-2111.
- SHCP. 2014. Impuesto a los combustibles fósiles. Recuperado de http://www.sat.gob.mx/fichas_tematicas/reforma_fiscal/Paginas/combustibles_fosiles_2014.aspx.
- Skees, J. and A. Enkh-Amgalan. 2002. Examining the feasibility of livestock insurance in Mongolia, Policy Research. Working Paper 2886. Rural Development and Natural Resources Sector Unit. The World Bank. Washington, D.C. 38 p.
- Skees, J., P. Varangis, D. Larson and P. Siegel. 2002. Can financial markets be tapped to help poor people cope with weather risk? Policy Research Working Paper No. 2812, The World Bank. Washington, D.C.
- Stednick, J. D. 1996. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yields. *J. Hydrol.* 176:79-95.
- Stringham, T. K., W. C. Krueger and P. L. Shaver. 2001. States, transitions and thresholds: further refinement for rangeland applications, Special Report 1024. Corvallis: Agricultural Experiment Station, Oregon State University.
- Swiss Re. 2002. Opportunities and risks of climate change. Swiss Reinsurance Company. Zurich 27 p.
- Tashimoto, T., J. R. Stedinger and P. Loucks. 1982. Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research* 18:14-20.
- Tomer, M. D. and K. E. Schilling. 2009. A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology. *Journal of Hydrology* 376:24-33.
- Transparency International. 2005. Global corruption report, Corruption in construction and post- conflict reconstruction.
- UNDP. 2007. Human development report 2007/2008. Adapting to the inevitable: national action and international cooperation, Chapter 4, United Nations Development Program. pp. 163-198.
- UNDP/FIELD. 2003. SIDS workshop on insurance and climate-related extreme weather events. Final Workshop Report. United Nations Development Program and Foundation for

- International Environmental Law and Development. Milan, Italy. Nov. 8. 20 p.
- UNFCCC. 2007. Assessing, predicting and managing current and future climate variability and extreme events, and implications for sustainable development. Background Paper, UNFCCC workshop on climate related risks and extreme events under the Nairobi work programme on impacts, vulnerability and adaptation. Cairo, Egypt. 18-20 June. 30 p.
- UNFCCC. 2014. La convención del cambio climático. Recuperado de http://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/la_convencion/items/6196.php.
- UNFCCC. 2015a. The Kyoto Protocol. 10th Anniversary, Timely Reminder Climate Agreements Work. Recuperado de <http://newsroom.unfccc.int/unfccc-newsroom/kyoto-protocol-10th-anniversary-timely-reminder-climate-agreements-work/#downloads>.
- UNFCCC. 2015b. The Paris Agreement. Recuperado de http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php.
- UNFCCC. 2016. Key decisions relevant for reducing emissions from deforestation and forest degradation in developing countries (REDD+). Decision booklet REDD+. Recuperado de http://unfccc.int/land_use_and_climate_change/lulucf/items/6917.php.
- Vargas, R., E. Yépez, J. L. Andrade, G. Ángeles, T. Arredondo, A. Castellanos, J. Delgado-Balbuena, J. Garatuza-Payan, E. G. Castillo, W. del Oechel, A. Sánchez-Azofeifa, E. Velasco, E. Vivoni and C. Watts. 2013. Progress and opportunities for monitoring greenhouse gases fluxes in Mexican ecosystems: the mexflux network. *Atmósfera* 26:325-336.
- Vargas, R., H. W. Loescher, T. Arredondo, E. Huber-Sanwald, R. Lara-Lara and E. A. Yépez. 2012. Opportunities for advancing carbon cycle science in Mexico: toward a continental scale understanding. *Environmental Science and Policy* 21:84-93.
- Wang, D. and M. Hejazi. 2011. Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States. *Water Resour. Res.* 47. W00J12. doi:10.1029/2010WR010283.
- World Bank. 2016. State and trends of carbon pricing. World Bank Group. Washington, D. C., USA. Recuperado de <http://documents.worldbank.org/curated/en/598811476464765822/State-and-trends-of-carbon-pricing>.
- World Bank Group/Global Environmental Facility Program. 2007. Managing climate risk: integrating adaptation into World Bank Group operations. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington, D.C. 32 p.
- Xu, X., B. R. Scanlon, H. Schilling and A. Sun. 2013. Relative importance of climate and land surface change on hydrologic changes in the US Midwest since the 1930s: implications for biofuel production. *Journal of Hydrology* 497:110-120.
- Zeuli, K. A. and J. R. Skees. 2005. Rainfall insurance: a promising tool for drought management. *Water Resources Development* 21:663-675.
- Zbigniew, M. 1999. Genetic algorithms + data structures = evolution programs, Springer. 336 p.
- Zhang, G. H., S. H. Fu, W. H. Fang, H. Imura and X. C. Zhang. 2007. Potential effects of climate change on runoff in the Yellow River basin of China. *Transactions of the ASABE* 50:911-918.
- Zheng, H., L. Zhang, R. Zhu, C. Liu, Y. Sato and Y. Fukushima. 2009. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin, *Water Resour. Res.* 45, W00A19, Doi:10.1029/2007WR006665.

