

Deforestación en Bolivia: una aproximación espacial

Deforestation in Bolivia: A Spatial Approach

*Jaime Daniel Leguía Aliaga**

*Horacio Villegas Quino***

*Javier Aliaga Lordemann****

Resumen

Este documento presenta evidencias de que las características ambientales, la infraestructura vial, los derechos propietarios y los aspectos demográficos son determinantes de la deforestación en Bolivia. Para ello se realizaron estimaciones por mínimos cuadrados ordinarios, y posteriormente se comprobó la existencia de interdependencia entre las regiones examinadas, estimándose en este último caso un modelo espacial de retardos.

Abstract

This document presents evidences of which the environmental characteristics, (the road infrastructure, the proprietary rights and the demographic aspects) are determining the deforestation in Bolivia. We realized estimations by MLS, verifying the existence of interdependence between the examined regions. As a result we used a lag space model.

Palabras clave: Deforestación, determinantes, econometría espacial, Modelo Espacial de Retardos

* Becario (Fellow) de Conservación Estratégica (CSF). La Paz-Bolivia. dleguia@gmail.com

** Investigador Asociado del Instituto de Investigaciones Socio Económicas (IISEC-UCB). La Paz-Bolivia. hvillegas@ucb.edu.bo. Administrador del Proyecto CELA.

*** Director del Instituto de Investigaciones Socio Económicas (IISEC-UCB). La Paz-Bolivia. jaliaga@ucb.edu.bo

Keywords: Deforestation, Determinants, Space Econometry, Space Model of Retardations

Clasificación / Classification JEL: C31, Q23

1. Introducción

En los últimos años la deforestación se ha constituido en uno de los temas prioritarios en las agendas nacionales e internacionales, principalmente por sus efectos sobre la pérdida de biodiversidad, el cambio climático, la reducción de la oferta de madera y la degradación del suelo, entre otros (Kaimowitz *et al.*, 1998). Según la FAO (2006), los latinoamericanos deforestaron cinco veces más por habitante rural que los africanos, y 40 veces más que los asiáticos.

Se estima que en Bolivia la deforestación está provocando la pérdida de cientos de miles de hectáreas de bosque por año. Las causas de esta deforestación son muy complejas y varían entre las distintas regiones del país. Sin embargo, se sabe que la ampliación de la frontera agrícola constituye la principal causa de deforestación (Pacheco, 2004).

También, se ha detectado que el acceso a infraestructura de carreteras incrementa la probabilidad de deforestación (Kaimowitz y Angelsen, 1999). Se asume que una alta densidad y crecimiento poblacional cerca a áreas forestales incrementa la presión sobre los bosques, y que la tenencia de la tierra y la falta de derechos de propiedad bien definidos son también causas importantes de este fenómeno. Por último, existe un conjunto de variables físico-ambientales que influyen fuertemente en el lugar donde los agentes deforestan (Kaimowitz y Angelsen, 1998)

En este sentido, Bolivia se constituye en un caso fundamental de estudio – aproximadamente el 50% del territorio tiene vocación forestal– en el que el modelamiento de este tipo de factores cobra importancia, debido a que existen complejas relaciones causales. Por lo tanto, este documento pretende medir y analizar las relaciones que presentan un conjunto de variables (caminos, derechos propietarios, características físicas y ambientales, población, etc.) en relación a la deforestación, a partir de una escala de análisis municipal.

Para tal efecto se utiliza un modelo econométrico espacial, el cual nos permite analizar el efecto de características físico-ambientales sobre la deforestación. El documento está

estructurado de la siguiente manera: en la sección dos se hace una aproximación conceptual al tema forestal, mientras que en la sección tres se examina la deforestación en Bolivia. En la cuarta sección se presenta el modelo econométrico utilizado; en la quinta, los resultados; y en la sexta sección se muestran las principales conclusiones del estudio.

2. Aproximaciones conceptuales

En esta sección nos enfocaremos en la definición de tres elementos conceptuales. Primero, la comprensión y delimitación del concepto de deforestación para fines de nuestro estudio, por tener el mismo diversas acepciones operativas. Segundo, desarrollaremos las nociones básicas sobre modelos económicos explicativos de la deforestación. Tercero, en el marco de estos últimos, incidiremos en el desarrollo teórico de variables clave para el análisis de los procesos de deforestación.

2.1. Deforestación

Según Wunder (2001), el concepto de deforestación está relacionado con varios términos no totalmente delimitados (pérdida de bosque, fragmentación, conversión o degradación). Por este motivo, el autor categoriza los diferentes enfoques predominantes sobre las definiciones de deforestación en visiones “amplia” y “estrecha”.

Por un lado, la visión “amplia” incluye no sólo la conversión del bosque a otros usos, sino también diferentes tipos de degradación que reducen la calidad del bosque en términos de densidad y estructura, servicios ecológicos, biomasa y diversidad de especies, entre otros. Bajo este enfoque, la tala selectiva se convierte en uno de los principales factores de deforestación.

Del otro lado, la versión “estrecha” de deforestación se enfoca estrictamente en el cambio del uso de la tierra forestal y puede implicar una completa destrucción de la cobertura forestal. Para Kaimowitz y Angelsen (1998), la deforestación describe una situación de remoción completa de largo plazo de la cobertura forestal. Para la FAO (2006), el criterio decisivo es la suficiente remoción de cobertura forestal para permitir usos alternativos de la tierra.

Para el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) existen varias maneras de abordar las definiciones de forestación, reforestación y deforestación.

La primera se basa en el concepto de cambio de uso de la tierra¹ y la segunda en la densidad de carbono. Según el PNUD (2008), la deforestación es un proceso de conversión por actividad humana directa de tierras boscosas en tierras no forestales, mientras que la remoción de bosque genera una pérdida de biomasa y de captura de carbono.

Finalmente, Wachholtz, *et al.* (2006) conceptualizan la deforestación de manera operativa para Bolivia, como la forma de cambio del uso de la tierra forestal a gran escala a partir del desmonte mecanizado. Otras formas de deforestación, tales como el aprovechamiento no sostenible de los recursos maderables, chaqueo y cicatrices de incendios forestales, no son tomadas en cuenta en esta definición.

2.2. Modelos económicos explicativos de la deforestación

Existen dos enfoques predominantes a nivel económico para el análisis de modelos de deforestación que se han estado desarrollando y adaptando a entornos específicos en las últimas dos décadas. El primero, elaborado por Kant y Redantz (1997), pretende captar las complejas interacciones asociadas a la deforestación en base a una estructura de trabajo multinivel, donde los factores clave que inciden sobre la deforestación están divididos en variables directas e indirectas. Los efectos de las causas directas están determinados por la compleja interacción de las causas indirectas (Yiridoe y Manang, 2001).

El segundo es el enfoque de Kaimowitz y Angelsen (1998), quienes elaboran un marco conceptual en el cual se realiza una detallada descripción de las variables y su correspondiente clasificación, así como la relación de dicha ordenación de variables con la escala de análisis (macro², meso y micro). De esta forma se cuenta con una estructura teórica y variables que permiten delimitar las investigaciones de deforestación según sus objetivos y escala.

A nivel micro se espera que los agentes elijan la asignación de sus recursos dado un contexto exógeno determinado por precios, condiciones iniciales, preferencias, políticas, instituciones y alternativas tecnológicas. A nivel meso los agentes poseen diversas características ecológicas, de estructura agraria, historia política, instituciones, relaciones comerciales, infraestructura

1 El IPCC (2000) define al uso de la tierra como el "conjunto total de disposiciones, actividades y aportes de que es objeto determinado tipo de cubierta terrestre (conjunto de acciones humanas). Fines sociales y económicos a que responde la gestión de las tierras (por ejemplo, pastoreo, extracción de madera, conservación)".

2 La escala a nivel micro considera a los hogares, granjas o empresas y áreas pequeñas (menos de un kilómetro cuadrado); la escala meso incluye como unidad a las regiones, municipios o provincias, y la escala macro comprende como unidad de análisis los niveles nacional y mundial.

y uso del suelo. Finalmente, a escala macro se enfatiza el análisis en las relaciones entre las variables subyacentes, parámetros de decisión y deforestación (Lambin, 1997:1).

2.3. Análisis de variables clave

Para fines de esta investigación, en esta sección nos enfocamos en variables tipo meso dentro del modelo de Kaimowitz y Angelsen. Empíricamente, en este tipo de estudios las unidades de medición son estados, regiones o municipios. De igual manera, se hace énfasis en los parámetros de decisión de los agentes económicos, considerando algunas variables relacionadas a las variables de decisión; de esta forma se realiza un análisis de las causas inmediatas de la deforestación. A continuación explicamos brevemente las principales variables utilizadas a nivel meso.

Población y deforestación

Se considera que el crecimiento de la población asociado a un cambio demográfico y sus efectos sobre la deforestación no son lineales ni directos, ya que dependen de otros factores. Según, Rosero-Bixby y Palloni (1997), existen rutas directas e indirectas que conectan el crecimiento poblacional con la deforestación. Entre las rutas directas están, por un lado, la escasez relativa de tierras en áreas tradicionalmente agropecuarias como consecuencia de la alta densidad de la población, y, por el otro lado, la creciente demanda de madera y alimentos. Entre los mecanismos indirectos se encuentran las condiciones que determinan la accesibilidad al bosque y la desigual distribución de la tierra.

Para Bonilla (1985), Harthshorn (1997) y Pérez y Protti (1978), el eslabón causal que permite entender cómo la presión demográfica incide sobre la tierra está relacionado con las políticas de Gobierno que favorecen los asentamientos y colonización de tierras públicas. En los trabajos elaborados por Southgate (1990) se argumenta que el crecimiento de la población en áreas forestales ocurre en respuesta a la construcción de caminos, disponibilidad de suelos de calidad y crecimiento de la demanda de productos agrícolas.

Derechos propietarios

Según Jaramillo y Kelly (2000), hay tres estratos en la relación existente entre la tenencia de tierra y la decisión de deforestar. Primero, la seguridad de los derechos de propiedad individual sobre las tierras agrícolas establecidas y sus efectos sobre la producción y el empleo agrícola. Segundo, los regímenes de tenencia sobre las áreas forestadas y sus efectos sobre el

manejo sostenible de los recursos. Tercero, las políticas que inciden sobre el cumplimiento de los derechos propietarios.

Los derechos de propiedad (o su ausencia) de la tierra con bosque y las políticas de titulación que premian el “desmonte” son los dos factores más importantes para Rosero-Bixby y Palloni (1997). De otro lado, los intereses económicos y sociales muchas veces constituyen incentivos más fuertes para la explotación de los bosques y su conversión que los incentivos derivados de la tenencia (Deininger y Minten, 1996).

Finalmente, en el caso de los recursos forestales es directo suponer que la tasa de descuento es alta y que la inestabilidad institucional y los contratos de arrendamiento a corto plazo constituyen elementos adicionales que generan incertidumbre sobre la tenencia de la tierra, incentivando un aprovechamiento selectivo y el desmonte del bosque.

El uso de la tierra

El impacto de la geografía sobre el desarrollo se deriva de la interacción entre las condiciones físicas y los patrones de asentamiento de la población en el territorio (BID, 2000). Para Butler y Ogendo (1994), la geografía hace énfasis en las distribuciones espaciales y ambientales de las actividades económicas. Estos autores sostienen que la dinámica de la geografía económica y su incidencia en las actividades económicas y de uso de la tierra contemplan dos enfoques interrelacionados: el espacial y el ambiental. El primero está referido a las regularidades espaciales y los esquemas resultantes de las fuerzas económicas, incluso si el ambiente fuera el mismo. En tanto que el segundo (denominado ecológico) estudia la ubicación de la actividad económica y cambios en el uso de la tierra, contemplado aspectos como clima, geología, vegetación y agua.

Factores espaciales

Según von Thünen. (1867), existe una renta asociada a la ubicación de un sitio. En este sentido, la renta es función del rendimiento, que a su vez depende de manera positiva del margen de ganancia y de manera negativa del costo de producción y de la distancia. Parafraseando a este autor, la agricultura (bosque) requiere grandes cantidades de superficie para cada granja (aprovechamiento forestal), y por lo tanto es necesario que éstas se sitúen a diferentes distancias. Como consecuencia de esto, los productos se transportan desde diferentes distancias, lo que provoca un aumento del coste para los productos más lejanos. Así, un incremento de la renta,

generada bien por el aumento de precio en el mercado, bien por la disminución del coste de producción, provoca un alejamiento de la distancia al mercado, y viceversa.

Infraestructura vial

Se establece que, en la medida que existan caminos cerca al bosque, existe una mayor probabilidad de deforestación; por lo tanto, también existe una relación positiva entre infraestructura vial y deforestación (Wunder, 2000). La mayoría de los estudios (Southgate, 1990; Krutilla *et al.*, 1995; Deininger y Minten (1996); Cropper *et al.*, 1997) que incluyen variables de acceso muestran que la deforestación es alta en lugares con más caminos y/o proximidad a mercados de ciudades grandes (Chomitz y Gray, 1996; Alston *et al.*, 1995; Mahar y Schneider, 1994).

Factores ambientales

La teoría de la renta económica desarrollada por David Ricardo en 1817 (incluir en biblio?) relaciona la calidad (ambiental) de la tierra medida por medio de parámetros tales como la fertilidad natural de la tierra con el ingreso de la granja. Esta renta se refiere a aquella parte del producto de la tierra que se paga al propietario para el uso de las fuerzas originales e indestructibles de la tierra. Dado que la tierra es fija e inmóvil, es necesario usar una calidad progresivamente más pobre de tierra conforme se eleva la población y la demanda económica.

En este sentido, la deforestación se ve afectada a medida que se amplían las áreas de cultivo. Para este autor también importa el factor espacial, dado que “la tierra más fértil y la más favorablemente ubicada será la primera que se cultive. De esta manera al cultivar en forma sucesiva tierra de peor calidad o tierra situada desfavorablemente, la renta se elevaría en la tierra previamente cultivada.

Pendientes y costos de producción

Butler (1994) señala que los costos de producción y transporte están relacionados con el grado de aspereza del terreno. Las regiones de terrenos ásperos por lo general presentan costos más altos porque necesitan insumos específicos para la producción y el transporte de un producto cualquiera. En el caso de la deforestación, los modelos económicos desarrollados sobre el tema predicen que mejores suelos y tierra con pendientes bajas o planas permiten un mayor desmonte, desde que los terratenientes prefieren deforestar las tierras más productivas (Kaimowitz y Angelsen, 1998).

3. Antecedentes de la deforestación en Bolivia

A continuación presentamos elementos de contexto sobre la evolución de la deforestación en Bolivia, con el propósito de aportar elementos clarificadores que serán de gran utilidad el momento de comprender las conclusiones a las que arriba este documento. En este sentido, en esta sección desarrollamos, primero, una tipificación sobre las características geográficas de Bolivia, para luego enfatizar los elementos fundamentales sobre el estado de situación de la deforestación en el país.

3.1. Tipificación geográfica de Bolivia³

En este acápite se pretende mostrar de manera panorámica la diversidad y riqueza de la estructura en pisos ecológicos que tiene Bolivia (más de nueve sistemas climáticos), en cuanto abarca territorios que van desde tierras altas (a más de 4.000 m.s.n.m.) hasta zonas tropicales muy cercanas a la selva amazónica brasilera. Para este fin seguimos el desarrollo que se detalla a continuación.

Primero, la Amazonía, que abarca los bosques que se encuentran en la cuenca del Amazonas. Ésta se constituye en una de las zonas más complejas y más ricas en especies de plantas y animales, y registra temperaturas promedio anuales entre 24 y 30° C. En general el clima es seco, con precipitaciones que van de 1.800 a 2.200 mm al año. En cuanto al uso del suelo, éste generalmente se usa para aprovechamiento de madera, goma, castaña, frutas silvestres y agricultura en pequeña escala.

Segundo, la Gran Chiquitanía, que es uno de los bosques secos más ricos en especies de plantas a nivel global. El clima se caracteriza por tener precipitaciones entre 600 y 1300 mm anuales, y una temperatura promedio anual que varía entre 21 y 30° C. El uso del suelo es generalmente para agricultura industrializada, ganadería en escala grande, aprovechamiento de madera y transporte de productos petroleros.

Tercero, la zona “Central Norte Integrado”, constituida por bosques situados en paisajes de llanura con topografía casi plana. Su altitud varía entre 150 y 250 msnm. Esta zona registra una temperatura media anual de 26°C y una precipitación anual promedio de 1347 mm. Las tierras de esta zona son aptas para agricultura y ganadería en una menor proporción.

³ Esta sección está basada en Montes de Oca (2007).

Cuarta, la región del Chaco, que es un complejo de bosques bajos, matorrales espinosos, sabanas secas y tierras húmedas. Las precipitaciones varían desde 500 mm hasta 1000 mm. La época seca abarca de 5 a 9 meses. La temperatura media anual se encuentra entre 22 y 26° C. En cuanto al uso del suelo, la zona es apta para la ganadería, extracción de madera, carbón y explotación petrolera.

Quinto, las sabanas del Beni, que se caracterizan por tener un clima húmedo con precipitaciones que van de 1100 a 5500 mm año, con una temperatura promedio de 22 a 29° C. En cuanto al uso del suelo, es destinado generalmente a ganadería y actividades agrícolas menores.

Sexto, la zona de los Yungas, cubierta de bosques que van desde los denominados “bosques nublados⁴” (entre 2800 y 3600 msnm), pasando por el “bosque húmedo montañoso” (entre 1200 y 2800 msnm) para terminar en el bosque de pie de monte (a menos de 1200 msnm). Esta particular configuración geográfica es única en el mundo y genera un microclima característico de zona tropical a 2000 msnm, con temperaturas medias de 24° C. El uso del suelo en esta zona está destinado generalmente a la agricultura y la coca.

Séptimo, el Bosque Tucumano Boliviano, que es una zona seca con precipitaciones que fluctúan entre los 1000 y los 1700 mm por año y temperaturas promedio que oscilan entre 10 y 23° C. En cuanto al uso del suelo, esta zona se caracteriza por ser apta para el aprovechamiento de madera, actividad agrícola y pastoreo.

Octavo, la Puna de los Andes Centrales, que se caracteriza por contar con niveles de precipitación de 900 a 1400 mm por año, con una temperatura promedio anual de 11° C y una altitud de 3376 m.s.n.m. Esta zona además presenta niveles de pendientes arriba del 80 por ciento, lo cual dificulta el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas extensivas.

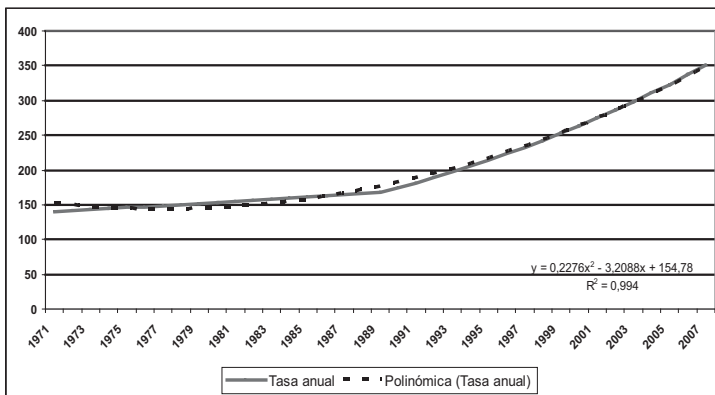
3.2. La deforestación en Bolivia

En los últimos decenios Bolivia ha registrado un incremento exponencial de la deforestación. Para el período 1975 a 1993 se determinó una tasa de deforestación del 0.3 por ciento, equivalente a 168.012 hectáreas por año (Wachholtz 2006: 34). Entre 1993 y 2000, el promedio se incrementó en 89 por ciento, llegando a 270.000 hectáreas por año (Rojas *et al.*, 2003: 10). Para los años 2004 y 2005 en áreas iguales o mayores a 5.3 hectáreas se

4 Son bosques cuya superficie se encuentra por encima del nivel de las nubes.

registraron 276.000 y 281.283 hectáreas deforestadas, respectivamente. Si se considera el resto de desmontes menores, se estima que la cifra puede alcanzar hasta medio millón de hectáreas (Muñoz, 2006: 1), como se puede ver en el Gráfico 1.

Gráfico 1: Evolución de las tasas de deforestación en Bolivia



Fuente: Elaboración propia en base a datos de UDAPE

Las áreas donde se registra la mayor cantidad de deforestación anual es la Chiquitanía⁵. En segundo lugar se encuentra la región Central Norte Integrado, conformada por 18 municipios. Por su parte, los Yungas⁶ y la Amazonía⁷ -regiones con la mayor cantidad de municipios- representan solo el 13.5 por ciento del total de deforestación promedio del período. En el caso del Chaco se registra el 11 por ciento de la deforestación promedio del período, mientras que en las sabanas del Beni la deforestación representa el 5 por ciento promedio del período (Gráfico 2).

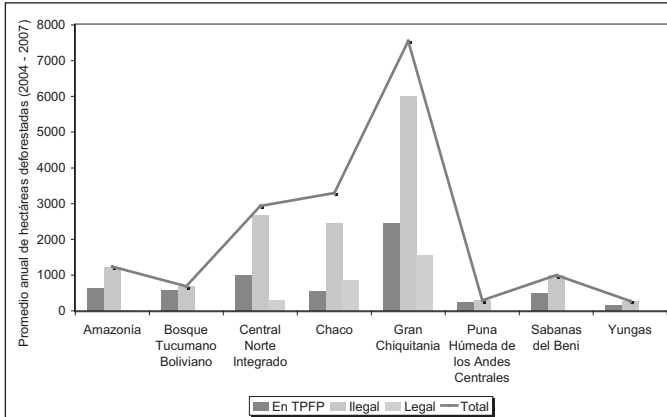
En todas las zonas el mayor porcentaje de deforestación es ilegal, únicamente en las regiones de la Gran Chiquitanía, Chaco y Central Norte Integrado existe un porcentaje mínimo de deforestación legal. De igual manera, en todas las zonas existe un porcentaje de deforestación realizado en Tierras de Producción Forestal Permanente, lo que significa que existen cambios de uso de suelo en tierras que por sus características tienen capacidad de mayor uso forestal.

5 En los municipios de Ascensión de Guarayos, El Puente, Pailón, San Ignacio de Velasco y San Julián.

6 Los principales municipios donde se genera una mayor deforestación en los Yungas son: Cajuata, Entre Ríos (Bulo Bulo), Inquisivi, Morochata, Tacacoma, Titora y Tiraque.

7 Los municipios en la Amazonía que presentan mayor deforestación son: Bella Flor, Guayaramerín, Puerto Rico, Riberalta y San Borja.

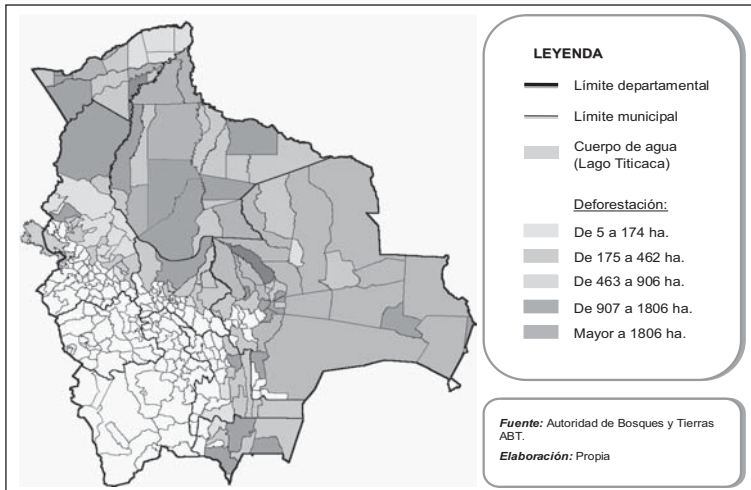
Gráfico 2: Deforestación promedio anual 2004–2007 por zonas



Fuente: Autoridad de Bosque y Tierra (ABT).

El Mapa 1 permite observar en qué rango de deforestación se encuentra cada municipio y en qué departamento se registra el mayor nivel de deforestación. Es evidente que el departamento de Santa Cruz (Gran Chiquitanía), en color guindo, presenta el mayor nivel de deforestación, mientras que el nivel más bajo de deforestación se encuentra en el departamento de La Paz, en color verde agua.

Mapa 1
Rangos de deforestación, según municipios.

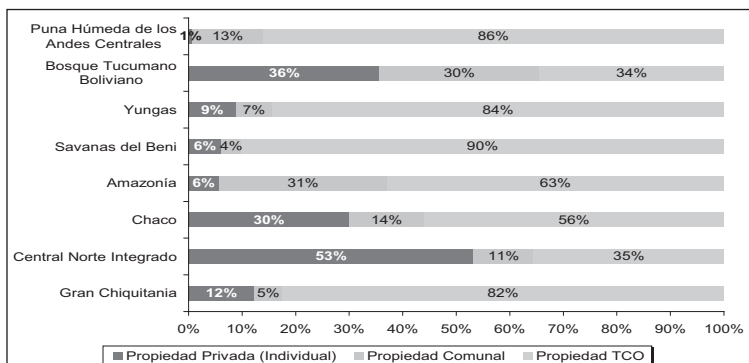


Fuente: Elaboración propia en base a datos de la ABT.

Derechos de propiedad

Al agrupar los diferentes tipos de derecho por propiedad privada, propiedad comunal y Tierra Comunitaria de Origen⁸ (TCO) -para cada eco región- se encuentra que, a excepción del Central Norte Integrado y del Bosque Tucumano Boliviano, todas las demás regiones -entre el 56 y el 90 por ciento del área- cuentan con alguna titulación bajo denominación de TCO.

Gráfico 3: Derechos de propiedad por tipo de título y ecoregión



Fuente: Elaboración propia en base a datos del Instituto Nacional de Reforma Agraria (INRA).

Las áreas donde se evidencia una mayor titulación de propiedad privada son el Central Norte Integrado, el Bosque Tucumano Boliviano, el Chaco y, en menor medida, la Gran Chiquitania. Por su parte, los títulos de propiedad comunal se concentran significativamente en las regiones de la Amazonía, Bosque Tucumano Boliviano y Chaco (Véase, Gráfico 3).

En la Amazonía existe una significativa titulación por uso agropecuario (77 por ciento) y una elevada tenencia de la tierra bajo propiedad comunitaria y TCO. Este aspecto explica en alguna medida los menores niveles de deforestación, ya que las actividades agropecuarias en la zona son generalmente de pequeña escala y de subsistencia (PNUD, 2009). Confirmar año

En el Chaco existe un 30 por ciento de propiedad privada en la tenencia de la tierra; las haciendas, principalmente en el área chaqueña de Santa Cruz, realizan actividades pecuarias extensivas. Por su parte las sabanas del Beni se caracterizan por contar con un alto porcentaje de tierras tituladas bajo la modalidad de TCO (90 por ciento), y el principal uso de la tierra registrado es el agropecuario, según Fundación Tierra (2008).

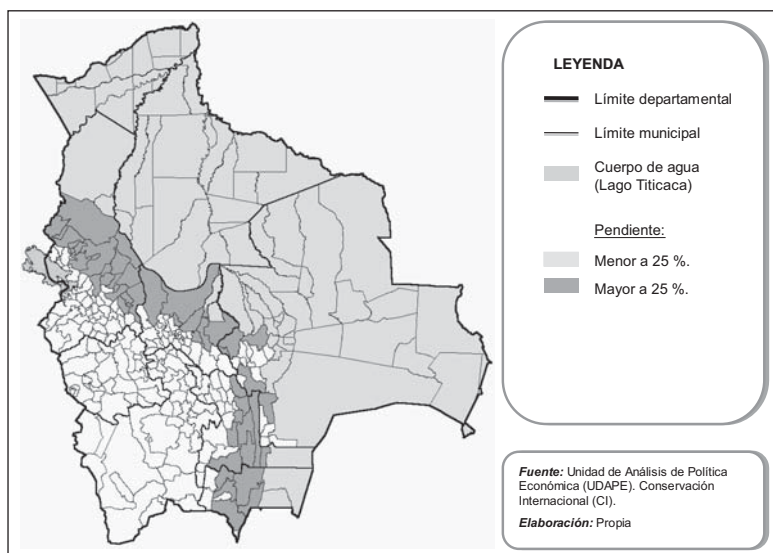
8 Tierras comunales tituladas de forma colectiva.

En lo que respecta a los Yungas y a la Puna de los Andes Centrales, las principales actividades en la zona son la agrícola y la agropecuaria de pequeña escala, con una alta presencia de derechos propietarios de TCO y comunidades. Esto ha incidido en los bajos niveles de deforestación registrados en relación a los estimados para la Gran Chiquitania y Central Norte Integrado.

Pendientes

Las zonas con altas pendientes –menor probabilidad de deforestación- se concentran en los departamentos de La Paz y parte de Cochabamba, Chuquisaca y Tarija, en tanto que las regiones con pendientes planas a moderadamente onduladas -menores al 25 por ciento del territorio- se localizan en los departamentos de Santa Cruz, Beni y Pando, así como parte del Chaco chuquisaqueño y tarijeño. En el Mapa 2 se aprecia que las regiones con altas pendientes también coinciden con áreas de bajos a medios rangos de desmonte. Para el caso de las sabanas, la presión sobre las superficies boscosas proviene por la introducción de ganadería intensiva (PNUD, 2008).

Mapa 2
Pendiente según municipio



Fuente: Elaboración propia en base a datos de *Conservación Internacional* y UDAPE.

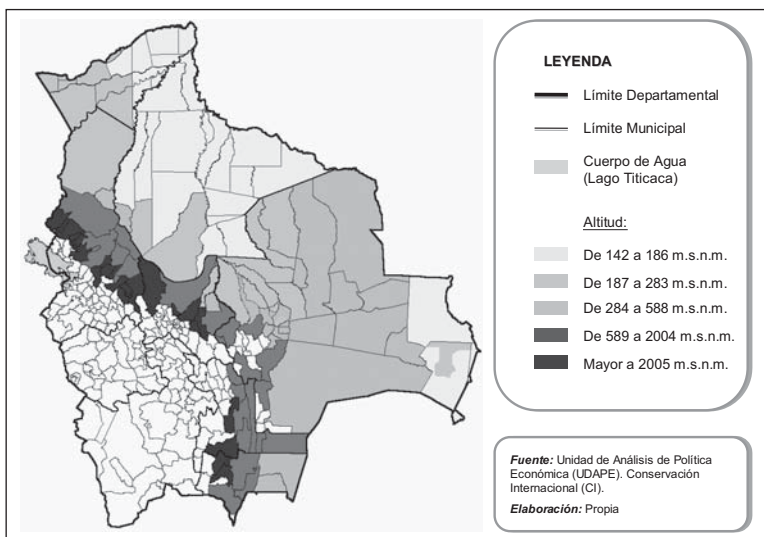
Altitud y precipitación

Empíricamente se ha identificado que las áreas con altitudes comprendidas entre 142 y 283 msnm por lo general presentan un mayor avance de la frontera pecuaria y tienen una mayor probabilidad de contar con sistemas de aprovechamiento ganadero extensivo (PNUD, 2008:303). En Bolivia hay zonas con altitudes menores a 588 msnm, ubicadas fundamentalmente en los departamentos de Pando, Beni y Santa Cruz. Es de esperar que esta condición geográfica presione sobre las superficies boscosas existentes en la región.

Se ha comprobado que en Bolivia la deforestación es menor en zonas altas, como la puna húmeda de los Andes Centrales, Yungas y Bosque Tucumano Boliviano, mientras que las regiones Central Norte Integrado y Chaco, al ser adecuadas para la producción agrícola y pecuaria intensiva y extensiva, también presentan altos índices de deforestación. La Amazonía y las sabanas del Beni, pese a que cuentan con niveles bajos de altitud, exhiben procesos de deforestación similares a los del Chaco, aspecto que se explica por las inundaciones estacionales, que no permiten la mecanización ni las actividades agropecuarias extensivas o comerciales (PNUD, 2009).

Además, es posible inferir que la relación entre deforestación y precipitación es ambigua, dado que ecoregiones con altos niveles de precipitación, como son la Amazonía y las sabanas del Beni, registran menores niveles de deforestación que zonas con bajos índices de precipitación, como la Gran Chiquitanía, Central Norte Integrado y Chaco. Esta situación se explica por una expansión de la frontera agrícola hacia áreas de buena fertilidad y adecuada precipitación (Baudoin *et al.*, 1995).

Mapa 3
Altitud según municipio



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Conservación Internacional y UDAPE.

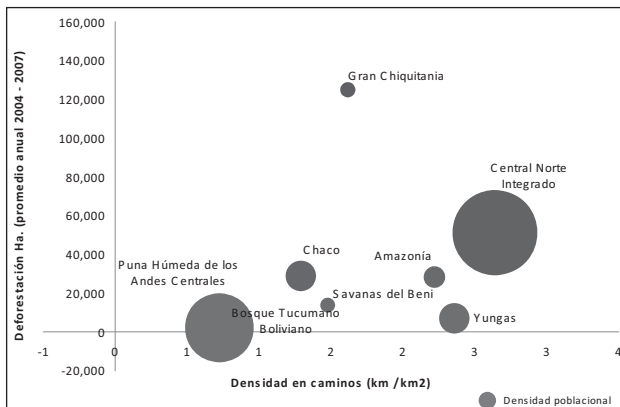
Infraestructura vial

Alrededor de las redes de caminos se extienden áreas de deforestación, las cuales se concentran en mayor proporción en el departamento de Santa Cruz, especialmente en la región Central Norte Integrado y parte de la Gran Chiquitanía. Además, estos lugares, por sus características ambientales y productivas, tienen una fuerte dinámica agropecuaria (PNUD, 2008).

Por ecoregiones, la mayor cantidad de kilómetros se concentran en la Amazonía (2,387 km), las sabanas del Beni (2.352 km.) y la Gran Chiquitanía (2,154 km). Por su parte, las regiones que exhiben una menor extensión de caminos son los Yungas, Bosque Tucumano Boliviano y Puna Húmeda de los Andes Centrales.

En base al criterio de proximidad territorial, se observa que las áreas cercanas a la ciudad de Santa Cruz -donde se localizan las actividades agrícolas intensivas de mediana a gran escala- exhiben una alta tasa de deforestación (PNUD, 2008). De igual manera, en los departamentos de Beni y Pando se registran altas tasas de deforestación en zonas próximas a carreteras principales (PNUD, 2008: 101).

Gráfico 4: Relación entre deforestación y densidad en caminos, por ecoregión



Fuente: Elaboración propia en base a datos de la Autoridad de Bosque y Tierra (ABT) y la Administradora Boliviana de Caminos (ABC).

4. Modelo econométrico de deforestación

Se ha contemplado la aplicación de técnicas econométricas desde un enfoque de la econometría espacial, enfoque de trabajo que se justifica por las siguientes razones:

- ♦ La deforestación es un fenómeno inherentemente espacial (Anderson, 2002: 113).
- ♦ Los datos contenidos en las variables de análisis provienen de Sistemas de Información Geográficos (SIG), los cuales, al ser agregados a nivel municipal, presentan errores de medida que requieren ser corregidos incorporando la dimensión espacial en el análisis (Vargas, 2007: 2).
- ♦ Recientemente los métodos de econometría espacial han incrementando su aplicación a diferentes áreas del conocimiento, en especial a la economía ambiental y de los recursos naturales, producto de la extensión de los sistemas de información geográfica y la necesidad de una visión espacial que contribuya de manera estratégica a los procesos de planificación, conservación y gestión de los recursos (Anselin, 1980), Moreno y Vayá, 2008).

4.1. La econometría espacial

Anselin (1999) y Moreno y Vayá (2008) señalan que la econometría espacial hace hincapié en aquellos aspectos metodológicos concernientes a los efectos espaciales, tales como

la interacción espacial (autocorrelación espacial) y la estructura espacial (heterogeneidad espacial) en los modelos de regresión de corte transversal y paneles de datos.

Autocorrelación espacial y heterogeneidad

La dependencia o autocorrelación espacial surge siempre que el valor de una variable en un lugar del espacio está relacionado con el valor en otro u otros lugares del espacio. La dependencia espacial no puede ser tratada por la econometría estándar, ello debido a la multidireccionalidad que domina las relaciones de interdependencia entre unidades espaciales.

La autocorrelación espacial puede ser positiva o negativa; si la presencia de un fenómeno determinado en una región lleva a que se extienda ese mismo fenómeno hacia el resto de regiones que la rodean, nos hallaremos ante un caso de autocorrelación positiva. Por el contrario, existirá autocorrelación negativa cuando la presencia de un fenómeno en una región impida o dificulte su aparición en las regiones vecinas a ella, es decir, cuando unidades geográficas cercanas sean netamente más disímiles entre ellas que entre regiones alejadas en el espacio. Por último, cuando la variable analizada se distribuya de forma aleatoria, no existirá autocorrelación espacial.

La heterogeneidad espacial consiste en la variación de las relaciones en el espacio. De forma general, se puede decir que existen dos aspectos distintos de heterogeneidad espacial: la inestabilidad estructural y la heteroscedasticidad. En el primer caso, la heterogeneidad espacial se refiere a la falta de estabilidad en el espacio del comportamiento de la variable bajo estudio, lo que lleva a que la forma funcional y los parámetros de una regresión puedan variar según la localización, siendo, por tanto, no homogéneos en toda la muestra. El segundo aspecto, la heteroscedasticidad, proviene de la omisión de variables u otras formas de errores de especificación que llevan a la aparición de errores de medida.

Dado que este efecto puede tratarse, en la mayoría de los casos, mediante técnicas econométricas tradicionales, el presente trabajo centra su análisis en el problema de la autocorrelación espacial.

Econometría espacial y econometría convencional

El interés en el análisis espacial surge de los efectos que se presentan a partir de un conjunto de datos de corte transversal cuyas unidades de observación corresponden a espacios

geográficos distintos (por ejemplo, cuando se cuenta con información para un conjunto de países, de departamentos o municipios de un mismo país, o de localidades de una misma ciudad, entre otros).

Recordemos que uno de los supuestos al plantear un modelo simple de regresión con datos de corte transversal es la independencia entre las observaciones. Este supuesto se pone en duda si las unidades a través de las cuales varía cada observación corresponden a espacios geográficos diferentes, ya que, como lo anotan Moreno y Vayá (2008), existe un efecto de multidireccionalidad que afecta a las unidades espaciales. En este caso no será conveniente llevar a cabo técnicas estadísticas o econométricas de análisis convencionales, pues la estimación MCO no es adecuada.

Matrices de ponderación espacial

Para incorporar en el modelo la dinámica espacial no se debe aplicar un operador de retardos, tal como sucede en el caso de la dependencia temporal, pues, a diferencia de ésta, la dependencia espacial es multidireccional (una región puede no sólo estar afectada por otra región contigua a ella, sino por otras muchas que la rodean, al igual que ella puede influir sobre aquéllas (Anselin, 1999).

La solución al problema de la multidireccionalidad en el contexto espacial pasa por la definición de la denominada matriz de pesos espaciales o de retardos, W , una matriz cuadrada no estocástica cuyos elementos, w_{ij} , reflejan la intensidad de la interdependencia existente entre cada par de regiones i y j .

Tipos de modelos

Dentro de la econometría espacial, los modelos de regresión se pueden dividir en dos grupos, de acuerdo a la forma de dependencia espacial que haya entre las observaciones.

Es posible que el citado efecto espacial esté presente en el contexto de un modelo de regresión, ya sea como consecuencia de la existencia de variables sistemáticas correlacionadas espacialmente o como consecuencia de la existencia de un esquema de dependencia espacial en el término de perturbación.

- ♦ Modelo de retardo espacial

En caso de que la variable endógena de un modelo de regresión lineal esté correlacionada espacialmente, la solución pasa por especificar el siguiente modelo:

$$y = \rho W y + X\beta + u \quad (1a)$$

$$u \rightarrow N(0, \sigma^2 I) \quad (1b)$$

Donde:

y es un vector ($N \times 1$).

W es el retardo espacial de la variable y . W es la matriz de conexiones $n \times n$ que define la estructura de vecindades.

X es una matriz de K variables exógenas.

u representa el término de perturbación, que se asume es ruido blanco.

N hace referencia a la distribución normal.

ρ corresponde al parámetro autorregresivo que recoge la intensidad de las interdependencias entre las observaciones muestrales.

- Modelo de dependencia espacial en el término de error

De igual forma, la autocorrelación espacial podría estar únicamente presente en el término de perturbación. Ante esta situación, se deberá considerar el siguiente modelo:

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (2a)$$

$$\varepsilon = \lambda W \varepsilon + u \quad (2b)$$

$$u \rightarrow N(0, \sigma^2 I) \quad (2c)$$

Donde:

λ es parámetro de dependencia espacial.

Método de estimación

Una vez definido el modelo de retardo espacial o dependencia espacial en el término de error, para la estimación de los parámetros, mayormente se aplica el método de Máxima Verosimilitud (*MV*). El punto de partida de este método es que establece como supuesto base la normalidad del término de error.

Para un modelo de dependencia espacial en el término de error, la ecuación de estimación es la siguiente:

$$\ln L = -(N/2) \ln(2\pi) - (N/2) \ln \sigma^2 + \ln |I - \lambda W| - (1/2\sigma^2)(y - X\beta)'(I - \lambda W) \cdot (I - \lambda W)(y - X\beta) \quad (3)$$

Por su parte, la ecuación de estimación de *MV* para el modelo con retardo espacial tiene la siguiente forma:

$$\ln L = -(N/2) \ln(2\pi) - (N/2) \ln \sigma^2 + \ln |I - \rho W| - (1/2\sigma^2)(y - \rho W y - X\beta)'(y - \rho W y - X\beta) \quad (4)$$

Además de la estimación máximo-verosímil, han sido propuestos en la literatura métodos de estimación alternativos, entre los que destacan la estimación por variables instrumentales (Haining, 1978; Bivand, 1984; Anselin, 1980) o el método generalizado de los momentos (Kelejian y Prucha, 1997). Dichos métodos de estimación se revelan como notablemente más simples que la estimación *MV*, incluso cuando el tamaño muestral es elevado. Asimismo, bajo determinadas condiciones, dichos estimadores son consistentes aun cuando el término de error no siga una distribución normal.

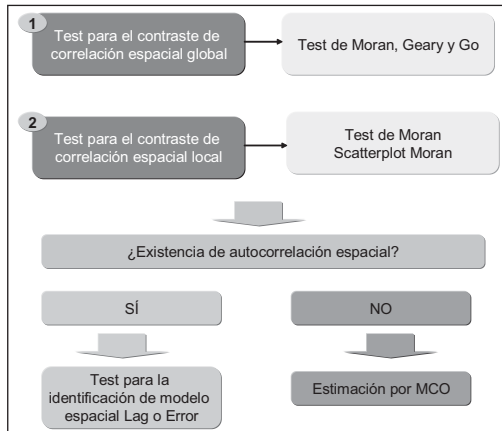
4.2. Aspectos metodológicos para la especificación del modelo

Una vez desarrollados los principales aspectos conceptuales relacionados a la econometría espacial, a continuación se describe el proceso metodológico para la especificación del modelo (de retardo o de error).

a) Metodología para la identificación de autocorrelación espacial

En el siguiente gráfico se presenta el proceso metodológico para el análisis de la correlación espacial:

Gráfico 5: Proceso metodológico para el análisis de correlación espacial

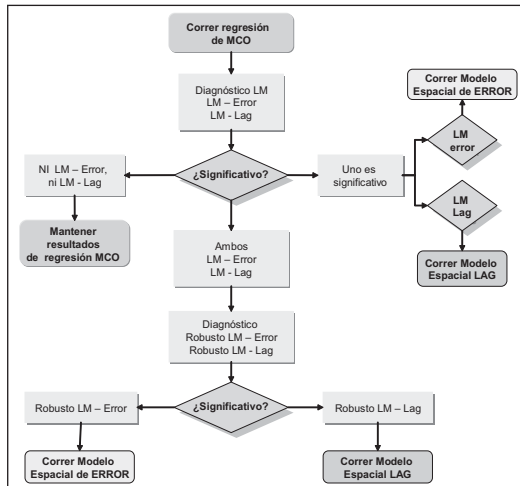


Fuente: Anselin (1999: 23).

b) Metodología para la identificación del modelo a estimar (lag o error)

Una vez identificada y validada estadísticamente la presencia de autocorrelación espacial, se procede a la definición del tipo de modelo que más se ajusta: de retardo espacial o de dependencia en el término de error.

Gráfico 6: Proceso de decisión para la definición del tipo de modelo espacial



Fuente: Anselin (1999: 23).

Para ello se aplican los test de LM (Multiplicador de Lagrange) – Lag y LM error, así como sus correspondientes robustos, los cuales permiten identificar el modelo a ser estimado.

En primer lugar, estimaremos la ecuación por MCO. Posteriormente se calcularán los contrastes de autocorrelación espacial. En caso de que a partir de dichos contrastes se rechace la hipótesis nula, aceptaremos la ecuación estimada por MCO, concluyendo que no existe ningún tipo de interdependencia entre las regiones. Si, por el contrario, el contraste I de Moran y el LM-ERR y su asociado robusto LM-EL fueran significativos, o al menos estos dos últimos mostrasen una probabilidad menor que la del test LM-LAG y su robusto LM-LE, estimaríamos el modelo del error espacial por máxima verosimilitud, donde el parámetro autorregresivo “ λ ” mediría la intensidad de la dependencia espacial entre los residuos.

Si el contraste I de Moran y el LM-LAG y su asociado robusto LMLE fueran significativos, o al menos estos dos últimos tuvieran un valor de la probabilidad menor que el LM-ERR y su robusto LM-EL, el modelo adecuado a estimar sería aquél que incluyera un retardo espacial de la variable endógena, habiendo de ser estimado también por máxima verosimilitud y donde el parámetro “ γ ” mediría la intensidad de las dependencias entre regiones vecinas.

5. Resultados

5.1. Especificación del modelo

Una vez comprendidos los aspectos conceptuales y metodológicos de la econometría espacial, en el presente apartado se realiza la aplicación de esta metodología para el análisis de la deforestación en Bolivia.

Para ello se desarrolla, en una primera instancia, la Matriz de Ponderación Espacial (MPE), para que en base a ésta se logren estimar los correspondientes test de autocorrelación espacial global y local, así como los contrastes para la identificación del modelo espacial. Se concluye el proceso con la descripción del modelo a estimar y de sus correspondientes variables.

c) Matriz de Ponderación Espacial (MPE)

Dicha matriz toma la forma de:

$$W = \begin{bmatrix} 0 & w_{12} & \cdot & w_{1n} \\ w_{21} & 0 & \cdot & w_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdot & 0 \end{bmatrix}$$

Donde w_{ij} representa la interdependencia existente entre las regiones i y j , las mismas que son estocásticas y exógenas al modelo (Pérez, 2006).

Con respecto a cómo definir los mencionados pesos, cabe destacar que no existe una definición unánimemente aceptada, si bien se ha de cumplir que dichos pesos sean no negativos y finitos (Anselin, 1980). A pesar de ello, de forma habitual se recurre al concepto de contigüidad física de primer orden, utilizado inicialmente por Moran (1948) y Geary (1954), donde w_{ij} es igual a 1 si las regiones i y j son físicamente adyacentes, o 0, en caso contrario (se asume por definición que $w_{ii} = 0$).

Éste es el criterio que se adopta en el presente estudio, dado que no se cuenta con información sobre distancias. Por ende, la composición de W determina la relación espacial de los municipios, y por ende las conexiones entre los mismos, es decir, se supone que existe comunicación de cada municipio con los vecinos con los que limita.

Teniendo en mente lo anterior, la MPE construida es una matriz cuadrada de 102 x 102. Los municipios considerados en el estudio forman parte de los departamentos de Pando, Beni, Santa Cruz y el norte de La Paz.

a) Variables a utilizarse

Antes de la estimación del modelo, es relevante realizar algunas precisiones sobre las variables consideradas en el modelo:

- ♦ **Deforestación.** Para el caso de la deforestación se han considerado dos tipos de variables:
- ♦ **Deforestación 2007.** Es el número de hectáreas deforestadas (calculadas a través de imágenes satelitales). Esta variable permite observar los procesos de deforestación en el corto plazo (Anderson *et al.*, 2002).
- ♦ **Deforestación acumulada del período 2004–2007.** Número de hectáreas acumuladas. Recoge el proceso de deforestación en el largo plazo (Anderson, 2009).
- ♦ Todas las variables explicativas corresponden al año 2007.

Infraestructura vial. Para observar el impacto de la infraestructura vial sobre los procesos de deforestación, se contempla la variable: densidad en caminos: Kms de caminos primarios y secundarios/kms cuadrados.

Características ambientales. Las variables contempladas en este ámbito de análisis son: i) precipitación promedio mensual, medida en términos de cm cúbicos y ii) la pendiente o grado de inclinación del municipio. No se introduce en el modelo la variable altitud, ya que ésta presenta altos niveles de autocorrelación con precipitación y pendiente.

Derechos propietarios. Para el caso de los derechos propietarios se han considerado las siguientes variables: propiedad privada y propiedad comunal, ambas medidas en número de hectáreas tituladas bajo dichas modalidades.

Población. En relación a los aspectos demográficos, se han considerado la densidad demográfica (hab./km²) y la categorización de tamaños de población utilizados por la Federación de Asociaciones Municipales de Bolivia⁹.

b) Test de autocorrelación global y local

Autocorrelación global

Los estadísticos globales de autocorrelación constituyen la aproximación más tradicional al efecto de dependencia espacial, permitiendo contrastar la presencia o ausencia de un esquema de dependencia espacial a nivel univariante, es decir, contrastar si se cumple la hipótesis de que una variable se encuentra distribuida de forma totalmente aleatoria en el espacio o si, por el contrario, existe una asociación significativa de valores similares o disímiles entre regiones vecinas.

Para realizar los contrastes de hipótesis de no existencia de autocorrelación espacial, se utilizan los estadísticos de I- Moran y Getis&Ord´s.

Cuadro 1
Medidas de autocorrelación global Moran's (I), Getis&Ord's (G)

| Variables | I | p-value |
|-------------------------|-------|---------|
| Deforestación 2007 | 0.320 | 0.000 |
| Deforestación acumulada | 0.376 | 0.000 |
| | G | p-value |
| Deforestación 2007 | 0.207 | 0.000 |
| Deforestación acumulada | 0.152 | 0.000 |

Fuente: Elaboración propia.

⁹ De acuerdo a su población, los municipios se dividen en cuatro categorías: A (hasta 5 mil habitantes), B (de 5 a 15 mil habitantes), C (de 15 a 50 mil habitantes) y D (más de 50 mil habitantes).

Para poder comprender los cálculos descritos en el Cuadro 1, es importante establecer criterios que orienten la lectura de los resultados:

- ♦ El test de Moran (I) establece como hipótesis nula la no correlación espacial, por lo que un valor significativo positivo (negativo) del estadístico estandarizado $Z(I)$ informará sobre la presencia de un esquema de autocorrelación espacial positiva (negativa), es decir, la presencia de valores similares (disimiles) de la variable entre regiones vecinas.
- ♦ Por su parte, Getis& Ord es una medida de la concentración espacial de una variable. Un valor positivo y significativo indica la existencia de una tendencia de concentración de valores elevados de la variable en el espacio analizado.

Teniendo en mente lo anterior, y ante las estimaciones realizadas en cada uno de los test, para el caso de la deforestación 2007 y la acumulada para el período 2004–2007, se puede concluir, que las variables presentan autocorrelación espacial positiva, dada la significancia de los índices de Moran y Getis& Ord, lo que implica la presencia de valores similares y la existencia de una concentración de los mismos.

Autocorrelación local

Dado que los tests de autocorrelación espacial global analizan todas las observaciones de la muestra de forma conjunta, no resultan sensibles a situaciones donde predomine una importante inestabilidad en la distribución espacial de la variable objeto de estudio, es decir, no contemplan la posibilidad de que el esquema de dependencia detectado a nivel global pueda no mantenerse en todas las unidades del espacio analizado.

Dicha limitación es fácilmente superable por medio de una aproximación más formal a la visualización de la dependencia espacial (scatterplot de Moran). El scatterplot de Moran es un tipo de gráfico que muestra en el eje de abscisas las observaciones de la variable normalizada y en el de ordenadas el retardo espacial de la misma también normalizado.

Gráfico 7: Scatterplot de Moran para la deforestación acumulada

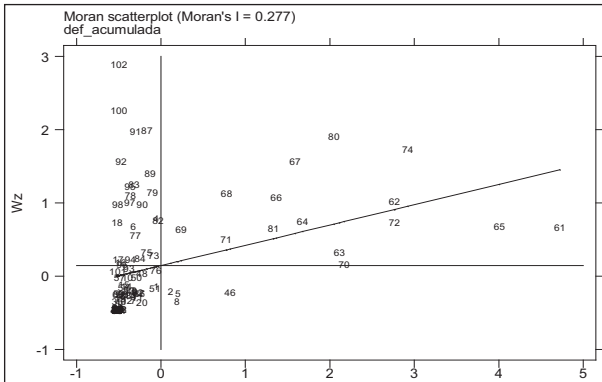
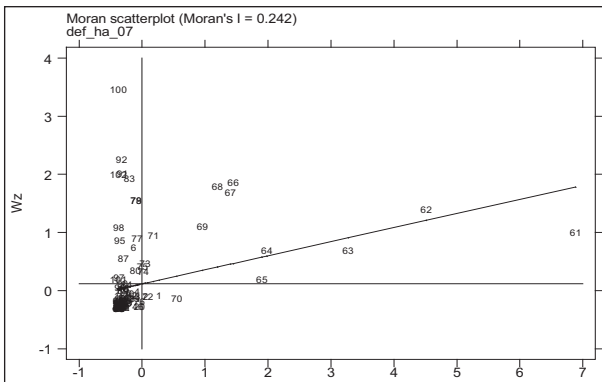


Gráfico 8: Scatterplot de Moran para la deforestación en 2007



Los cuatro cuadrantes reproducen diferentes tipos de dependencia espacial. Si la nube de puntos está dispersa en los cuatro cuadrantes es indicio de ausencia de correlación espacial. Si por el contrario los valores se encuentran concentrados sobre la diagonal que cruza los cuadrantes I (derecha superior) y III (izquierda inferior), existe una elevada correlación espacial positiva de la variable, coincidiendo su pendiente con el valor de la I de Moran. La dependencia será negativa si los valores se concentran en los dos cuadrantes restantes.

Con el análisis de correlación espacial local se comprueba la existencia de una dependencia espacial positiva, dada la concentración de puntos en el cuadrante 3. Esto implica que los vecinos son similares y la estructura espacial es compatible con el concepto de difusión, es

decir, que municipios con altos niveles de deforestación se encuentran en áreas donde los procesos de deforestación son significativos (Vargas, 2007).

c) Test de diagnóstico de identificación del modelo

Una vez evidenciada la existencia de autocorrelación espacial, a partir de los test globales y locales de dependencia espacial, el siguiente paso es elegir el modelo espacial más adecuado. Para ello se aplican los test LM y sus Robustos, en base al proceso de decisión definido en la metodología para la identificación del modelo.

Producto de dicha aplicación se encuentran los siguientes resultados:

Cuadro 2
Test LM y LM robusto de deforestación (2007)

| Test | Estadístico | p-value |
|--------------------------|-------------|---------|
| Spatial error | | |
| Lagrangemultiplier | 4.184 | 0.041 |
| RobustLagrangemultiplier | 0.085 | 0.771 |
| Spatiallag | | |
| Lagrangemultiplier | 6.753 | 0.009 |
| RobustLagrangemultiplier | 2.654 | 0.103 |

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3
Test LM y LM robusto de deforestación acumulada (2007)

| Test | Estadístico | p-value |
|--------------------------|-------------|---------|
| Spatial error | | |
| Lagrangemultiplier | 4.452 | 0.035 |
| RobustLagrangemultiplier | 0.044 | 0.833 |
| Spatiallag | | |
| Lagrangemultiplier | 6.846 | 0.009 |
| RobustLagrangemultiplier | 2.438 | 0.118 |

Fuente: Elaboración propia.

Los estadísticos LM error y de retardo (lag) son significativos tanto para la variable deforestación en 2007, como para la variable deforestación acumulada para el período 2004-2007. En ambos casos se elige el modelo de rezago espacial, ya que tanto el estadístico LM como el LM robusto son menores a los encontrados en el modelo de error espacial. A continuación se presentan los resultados de la estimación.

Cuadro 4
Resultados de la estimación de los modelos

| Ámbitos de análisis | Variables | Mínimos cuadrados ordinarios | | | Modelo espacial de retardo |
|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| | | Deforestación 2007 | Deforestación acumulada 2004-2007 | Deforestación 2007 | Deforestación acumulada 2004-2007 |
| Características ambientales | Precipitación | *-57,80372 | | ** -45,64381 | |
| | Pendiente | ** -42,72716 | ** -73,34981 | *** -30,25399 | *** -39,26915 |
| Infraestructura vial | Densidad en mts./km2 | ** -19,47858 | | ** -19,99721 | |
| Derechos propietarios | Propiedad privada | *0,0775366 | *0,14592 | *0,078195 | *0,14711 |
| Población | Población entre 15000 y 50000 | **3051,82 | *11657,03 | **2888,303 | *10367,21 |
| Estadísticos de análisis MCO | | | | | |
| Número de observaciones | | 102 | 102 | 102 | 102 |
| R2 | | 0,59 | 0,5393 | | |
| R2 ajustado | | 0,5686 | 0,5153 | | |
| Estadísticos Espacial lag | | | | | |
| Rho | | | | ***0,12509 | **0,21071 |
| log likelihood | | | | -1.019,6219 | -1.098,4647 |

* significativo al 1%, ** significativo al 5%, ***no significativo

Análisis general

Las estimaciones realizadas a través de mínimos cuadrados ordinarios y por el modelo espacial de retardos, para la deforestación del año 2007, muestran que las características ambientales, la infraestructura vial, los derechos propietarios y los aspectos demográficos son determinantes de la deforestación.

Para el caso de la deforestación acumulada en 2007, las estimaciones realizadas por MCO establecen que las características ambientales, los derechos propietarios y los aspectos demográficos son los determinantes de la deforestación. En el modelo de rezago espacial dejan de ser relevantes las características ambientales.

El parámetro rho en el modelo 2007 es no significativo, lo que significa que el modelo que no captura la dependencia espacial, y esta se transmite a los residuos. Esto no implica que no exista dependencia espacial (el efecto espacial no es capturado, pero los test de Moran, Gets y Ord si lo evidenciaron).

Por otra parte, rho es significativo en el modelo de rezago espacial para la deforestación acumulada, lo que significa que existen áreas de concentración de la deforestación. Esto se explica fundamentalmente por las dinámicas productivas agropecuarias existentes en las diferentes zonas analizadas.

En relación a los signos esperados y los encontrados, a continuación se hace un análisis específico para cada una de las variables consideradas en el modelo.

Análisis específico por variable

- ♦ Infraestructura vial.

Desde una perspectiva teórica se esperaría que, a medida que se incremente la densidad en caminos, exista mayor presión sobre el bosque, aumentando, de esta forma, la probabilidad de deforestación (Kaimowitz y Angelsen, 1998; Wunder, 2001; Rosero-Bixby y Palloni, 1997).

La evidencia nos presenta un signo negativo, lo que contradice a la teoría planteada. Sin embargo, este fenómeno encuentra su explicación en los siguientes factores:

- ♦ El Instituto Internacional de Economía y Empresa (2009), en un estudio realizado para el Programa de Cambios Climáticos sobre la deforestación en Bolivia a nivel municipal encontró que:

la existencia de buenos caminos no tiene tanta importancia para la intensidad de deforestación, ya que existían municipios con pocos caminos y una baja deforestación, pero los municipios con altas intensidades de deforestación no están entre los municipios con mayor densidad, ni mayor extensión, de caminos, y los municipios con la mayor cantidad de caminos todos tienen bajas intensidades de deforestación. Esto último se debe en muchos casos al hecho de que ya se ha deforestado casi todo el bosque en los municipios con una buena red caminera, pero Caranavi y Chulumani, por ejemplo, tienen una buena red caminera, y aunque todavía queda mucho bosque en éstos, la intensidad de deforestación es baja (IIDEE, 2009: 13).

- ♦ Existen áreas donde existen mayores niveles de deforestación; sin embargo, por la dimensión del territorio, la densidad en caminos es muy baja. No obstante, las condiciones ambientales, la dinámica de las actividades productivas agrícolas y pecuarias de la zona, definen muchas veces los procesos de la deforestación.

Características ambientales.

Se evidencia que la pendiente es un factor determinante de la deforestación, ya que áreas con niveles de pendiente arriba de 25 por ciento representan un mayor costo para el cambio de usos y para la realización de actividades agrícolas o pecuarias.

En el caso de la precipitación, se esperaba una relación positiva, es decir, que mayores niveles de precipitación se correspondieran con mayores niveles de deforestación, dadas las condiciones de disponibilidad de agua necesarias para el desarrollo de la actividad ganadera y agrícola. Sin embargo, el hecho de que los resultados hayan presentado una relación inversamente proporcional se debe a que, en la realidad, zonas con altos niveles de precipitación, como son las sabanas benianas o la puna húmeda de los Andes tropicales, son áreas donde no se concentran los mayores niveles de deforestación. Al contrario, la concentración de la deforestación se ha dado más en áreas con bajas a medios niveles de precipitación, como son la Chiquitanía y el Central Norte Integrado.

- ♦ Densidad poblacional.
- ♦ Bolivia en general presenta áreas con bajos niveles de densidad. Al contrastar esta variable con la deforestación, se encuentra que no es significativa. Esto es evidente dado que investigaciones realizadas por el IIDEE (2009) establecen que

Los altos niveles de intensidad de deforestación se encuentran solamente en municipios con una población rural muy dispersa (menos de 10 habitantes rurales por km²). En cambio, los municipios que ya se han poblado con gente y donde la tierra ya se ha distribuido entre los habitantes, allí se encuentran bajas intensidades de deforestación (IIDEE, 2009).

Al incorporar en el modelo la categoría de población C¹⁰ definida por FAM, se evidencia que los municipios que están en dicha categoría de población son los que generaron, para el período 2004–2007, el mayor nivel de deforestación.

- ♦ Derechos propietarios.

En relación a los derechos propietarios, se esperaba que ante la presencia de derechos propietarios bien definidos, tanto privados como comunales, los procesos de deforestación se redujeran. En la práctica se evidencia una relación positiva, lo cual significa que, a medida

10 De 15.000 a 50.000 habitantes.

que existe más propiedad privada se generan mayores procesos de deforestación, justificando de esta forma lo planteado por la Unión Mundial para la Naturaleza, según la cual se plantea la tragedia de privados.

6. Conclusiones

Tanto las estimaciones realizadas a través de mínimos cuadrados ordinarios como por el modelo espacial de retardos, para la deforestación del año 2007, muestran que las características ambientales, la infraestructura vial, los derechos propietarios y los aspectos demográficos **son determinantes** de la deforestación.

Se ha evidenciado que la variable deforestación presenta autocorrelación espacial con altos grados de concentración. Es decir que existen zonas donde se registran altos niveles de deforestación acompañados por otras áreas geográficas donde se registran muy bajos índices de deforestación.

En relación a los derechos de propiedad, se verifica la existencia de una tragedia de los privados, ya que la presencia de propietarios privados es significativa en los procesos de deforestación.

Una de las lecciones sobre los derechos de propiedad es que el establecimiento de derechos formales de propiedad no es suficiente para promover la conservación de los recursos naturales, especialmente cuando otras políticas públicas estimulan estrategias de corto plazo.

Se ha verificado que la variable población no es significativa estadísticamente. Sin embargo, la teoría y el análisis cualitativo realizado muestran que los asentamientos humanos generalmente se han constituido en variables endógenas al proceso de deforestación, ya que dichos procesos de colonización en áreas de bosque generalmente se han dado a partir de la generación de condiciones de infraestructura y de empleo.

Se evidencia que la pendiente es un factor determinante de la deforestación. En el caso de la precipitación, se esperaba una relación positiva, es decir, que mayores niveles de precipitación se correspondieran con mayores niveles de deforestación, dadas las condiciones de disponibilidad de agua necesarias para el desarrollo de la actividad ganadera y agrícola. Sin embargo, el hecho de que los resultados hayan presentado una relación inversamente

proporcional se debe a que, en la realidad, zonas con altos niveles de precipitación, como son las sabanas benianas o la puna húmeda de los Andes tropicales, son áreas donde no se concentran los mayores niveles de deforestación. Al contrario, la concentración de la deforestación se ha dado más en áreas con bajas a medios niveles de precipitación, como son la Chiquitanía y el Central Norte Integrado.

A modo de conclusión, es posible inferir que cuando se hace el análisis de la infraestructura vial a partir de la densidad de caminos, se observa que las zonas con una gran extensión no cuentan con una densidad en caminos significativa, lo que implica que existen zonas en dichas regiones que son aún poco accesibles, lo que incide en los costos de transporte. Sin embargo, en el caso particular de la Gran Chiquitanía, pese a contar con menor densidad en caminos en relación a la Amazonía y los Yungas, su articulación al Central Norte Integrado incide en las propias actividades realizadas en dicha región, y por ende en las decisiones de uso de suelo y los procesos de deforestación.

Ante la evidencia mostrada en el presente estudio, se ha logrado identificar los siguientes vacíos de investigación, según algunas temáticas de relevancia.

Deforestación y cambio climático

Según datos oficiales de las Naciones Unidas y el IPCC, entre un 10 a 25 por ciento de las emisiones anuales de gases de efecto invernadero se producen por la deforestación. Por ende, un análisis de los costos de oportunidad de la deforestación en regiones específicas brindaría las pautas generales para la implementación de mecanismos tipo REDD (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación evitada).

Deforestación y derechos propietarios y otros aspectos institucionales

Para comprender adecuadamente el vínculo entre deforestación y los derechos de propiedad, es menester realizar más investigaciones empíricas en profundidad. Igualmente, la realización de estudios sobre la responsabilidad y capacidad institucional de los municipios en temas de gestión forestal y reducción de la deforestación, es relevante para las políticas públicas.

Deforestación y población

Producto de la investigación se ha identificado la necesidad de realizar estudios a profundidad en relación a la deforestación y la población, considerando en próximas investigaciones los efectos migratorios.

Deforestación y modelo micro

Análisis sobre los factores que determinan las decisiones e incentivos de deforestación a nivel de hogares de las comunidades en áreas concretas de análisis.

Deforestación y otros aspectos relevantes

Evidentemente, existen otros factores (históricos, económicos y políticos) que afectan el proceso de deforestación en Bolivia. La investigación futura deberá evaluar la posibilidad de incorporar este tipo de variables en un modelo de econometría espacial.

Artículo recibido en: septiembre de 2010

Manejado por: ABCE

Aceptado en: marzo de 2011

Referencias

1. Alston, Lee J, Gary D. Libecap y Robert R. Schneider. (1995). "*A Property Rights and the Preconditions for Markets: The case of the Amazon Frontier*". *Journal of Institutional and Theoretical Economics* 15:89- 107.
2. Anderson, C. (2002). "*Self-organization in relation to several similar concepts: are the boundaries to self-organization indistinct?* *Biological Bulletin* 202: 247-255.
3. Anselin, L. (1980). "*Estimation methods for spatial autoregressive structures*". Regional Science Dissertation and Monograph Series 8. Field of Regional Science, Cornell University, Ithaca, N.Y.
4. Anselin, L. (1988). "*Spatial Econometrics: Methods and Models*". Kluwer Academic, Dordrecht.
5. Anselin, L. (1999). "*Spatial Econometrics*". Bruton Center. School of Social Sciences. University of Texas at Dallas. Estados Unidos.
6. Anselin, L. (2002). "*Spatial Externalities, Spatial Multipliers and Spatial Econometrics*". Regional Economics Applications Laboratory (REAL) and Department of Agricultural and Consumer Economics University of Illinois, Urbana-Champaign Urbana, IL 61801.USA.
7. Baudoin, L., S. Piry y J. M. Cournot. (1995). "*Analytical Bayesian Approach for Assigning Individuals to Populations*".
8. BID. (2000). "Desarrollo más allá de la economía". Prefacio. En: *Desarrollo más allá de la economía: progreso económico y social en América Latina*. Washington D.C. Estados Unidos. Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
9. Bivand, R. S. (1984). "*Regression modeling with spatial dependence: an application of some class selection and estimation methods*". *Geographical Analysis*, 16:25–37.
10. Bonilla, J. (1985). *Situación ambiental de Costa Rica*. Ministerio de Cultura, Salud y Deportes. Costa Rica.

11. Butler, J. R. y H. Ogendo. (1994). *Geografía económica: aspectos espaciales y ecológicos de la actividad económica*. México: Noriega.
12. Chomitz, K.M. y D.A. Gray. (1996). "Roads, lands, markets, and deforestation, a spatial model of land use in Belize". *World Bank Economic Review*, 10: 487-512.
13. Cropper, M., C. Griffiths y M. Mani (1997). "Roads, population pressures, and deforestation in Thailand, 1976-89". *Policy Research*. Working Paper N° 1726. World Bank, Washington, DC.
14. Deininger, K. y B. Minten. (1996). "Poverty, Policies and Deforestation: The case of Mexico". Research Project on Social and Environmental Consequences of Growth – oriented Policies, Working Paper N° 5. Policy Research Department. World Bank. Washington, DC. Estados Unidos.
15. Deininger, J., Bart Minten y Christopher B. Barrett. (2008). "Agricultural Technology, Productivity, and Poverty in Madagascar". *World Development*, Elsevier, 36(5), 797-822, May.
16. FAO. (2006). *El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo. La erradicación del hambre en el mundo: evaluación de la situación diez años después de la cumbre mundial de la alimentación*. Informe Departamento Económico y Social.
17. Fundacion Tierra. Regional Altiplano. (2008). *Gestión territorial comunitaria. Experiencias en las comunidades de las tierras altas de Bolivia*. Informe.
18. Geary, R. (1954). "The contiguity ratio and statistical mapping". *The Incorporated Statistician* (5), 115-145.
19. Haining, R.P. (1978). "A Spatial Model for High Plains Agriculture". *Annals of the Association of American Geographers*, 68 (4), 493–504, December.
20. Hartshorn, G. (1997). *Costa Rica: perfil ambiental*. San José, Costa Rica.
21. IIDEE. (2009). *Consultoría para la incorporación del país en los mecanismos de incentivos para la reducción de las emisiones de CO2 de la deforestación*

- en el ámbito nacional*. Programa Nacional de Cambio Climático (PNCC). La Paz. Bolivia: Instituto Internacional de Economía y Empresa (IIDEE).
22. Jaramillo, C. y T. Kelly. (2000). *La deforestación y los derechos de propiedad en América Latina*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
 23. Kaimowitz, David y Arild Angelsen. (1998). *Economic Models of Tropical Deforestation. A review*. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR).
 24. Kaimowitz, D. y A. Angelsen. (1999). *Economic Models of Tropical Deforestation: A review*. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR).
 25. Kant, S. y A. Redantz. (1997). "An econometric model of tropical deforestation". *Journal of Forest Economics*, (3) 51–86.
 26. Kelejian, Harry H. e Ingmar R. Prucha. (2007). "HAC estimation in a spatial framework". *Journal of Econometrics*, 140 (1), 131-154. Analysis of spatially dependent data. 2007
 27. Krutilla, K., W.F. Hyde y D. Barnes. (1995). "Peri-urban deforestation in developing countries". *Forest Ecology and Management*, 74, 181-95. United States.
 28. Lambin, E.F. (1997). "Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions". *Progress in Physical Geography*, 21, 375-93. Bruselas.
 29. Mahar, D. y Robert Schneider. (1994). *Incentives for Tropical Deforestation: Some Examples from Latin America*. En K. Brown y D. W. Pearce (Eds). *The Causes of Tropical Deforestation*. Londres: University College London Press.
 30. Moran, P. (1948). "The statistical distribution of the length of a rubber molecule". *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 44, 342-344 doi:10.1017/S030500410002435X.
 31. Moreno, R. y E. Vayá. (2008). "Econometría espacial: nuevas técnicas para el análisis regional. Una aplicación a las regiones europeas". Investigaciones Regionales. Universidad de Barcelona. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Barcelona, España.

32. Muñoz, A. (2006). *Apuntes de la audiencia técnica. Avances de la deforestación en Bolivia*. Superintendencia Forestal. Proyecto Bolfor II. Santa Cruz, Bolivia
33. Pacheco, P. (2004). *Las fronteras agrícolas en el trópico boliviano: entre las situaciones heredadas y los desafíos del presente*. Indonesia: Centro de Investigación Forestal Internacional (CIFOR), Investigador asociado, Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM). Brasil.
34. Pérez, J. (2006). "Econometría espacial y ciencia regional". *Investigación Económica*. 65 (258). Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México.
35. Pérez, S. y F. Protti. 1978. *Comportamiento del sector forestal durante el período 1950-1977*. San José, Costa Rica: Oficina de Planificación Sectorial Agropecuaria.
36. PNUD (2008). "Más allá del impase entre desarrollo y conservación". En *La otra frontera: usos alternativos de recursos naturales en Bolivia*. (pp. 29 – 85). Informe Nacional sobre Desarrollo Humano. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). La Paz. Bolivia.
37. Rojas, D., I. Martínez, W. Cordero y F. Contreras (2003). *Tasa de deforestación de Bolivia: 1993–2000*. Superintendencia Forestal. Proyecto BOLFOR. Santa Cruz, Bolivia.
38. Rosero-Bixby, L. y A. Palloni. (1997). *Población y deforestación en Costa Rica*. Academia Nacional de Ciencias. Programa Centroamericano de Población. Costa Rica.
39. Southgate, D. 1990. "The Causes of Land Degradation along "Spontaneously" Expanding Agricultural Frontiers in the Third World". *Land Economics*. United States. 66:1, 93 - 101.
40. Thünen, Johann Heinrich von. (1867). *Isolierte Staat in Baziellung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie*.
41. Vargas, M. (2007). *A spatial study about municipal poverty in Bolivia*. Unidad de Análisis de Políticas Económicas (UDAPE). PNUD. Munich Personal RePEc Archive.

42. Wachholtz, R. (2006). *Avance de la deforestación mecanizada en Bolivia: tasa anual de deforestación mecanizada en los años 2004 y 2005*. Proyecto: Combate a la Deforestación ilegal e Incendios del bosque boliviano (CDI). USAID/TNC. BOLFOR II. CIM-GTZ. Santa Cruz, Bolivia.
43. Wunder, S. (2001). *Economics of deforestation*. CIFOR.
44. Yiridoe, E. y D. Nanang. (2001). *An econometric analysis of the causes of tropical deforestation: Ghana*. Nova Scotia Agricultural College. Canadá.

Análisis y pronóstico de la demanda de potencia eléctrica en Bolivia: una aplicación de redes neuronales

Power Electric Demand in Bolivia Analysis and projection: A Neuronal Network Application

*Gimmy Nardó Sanjinés Tudela**

Resumen

El objetivo del presente trabajo de investigación es analizar la demanda de energía eléctrica en Bolivia con base en el pronóstico de series de tiempo. La predicción de datos futuros desde la perspectiva económica es importante porque se utiliza para optimizar la asignación de la energía en el tiempo, bajo la premisa de que cualquier mejora en la disminución del error de pronóstico representa una mejora en el excedente del consumidor. El pronóstico, por su complejidad, es realizado básicamente mediante cuatro fases; modelos armónicos, modelos Arima x Sarima, modelos Arma-Garch y finalmente modelos con base en redes neuronales artificiales. Los resultados muestran que el mínimo error se logra utilizando redes neuronales artificiales, y finalmente se concluye que el beneficio económico por la implementación de los modelos de redes neuronales artificiales en la predicción de la demanda de potencia eléctrica se presenta por la reducción de los costos incrementales generados por el error de pronóstico.

* Investigador del Instituto de Investigaciones Socio Económicas (IISEC-UCB). La Paz-Bolivia.
g_sanjinez_t@ucb.edu.bo

Abstract

The objective of this research is to analyze the demand for electricity in Bolivia, based on time series forecasting. The prediction of future data from the economic perspective is important because it is used to optimize the power allocation over time under the premise that any improvement in forecast error reduction is an improvement in consumer surplus. The prognosis for its complexity is done primarily through four phase's harmonic models, models Arima x Sarima, Arma-Garch models and finally models based on Artificial Neural Networks. The results show that the minimum error is achieved using artificial neural networks and finally concluded that the economic benefit from the implementation of artificial neural network models in predicting the electrical power demand is presented by the reduction of incremental costs generated by the forecast error.

Palabras clave: Demanda eléctrica, asignación energética, inteligencia artificial, redes neuronales artificiales, modelado en espacio de frecuencias, pronóstico, Modelos Arima x Sarima, Modelos Arma-Garch, estimación de número de armónicas, transformada de Fourier.

Keywords: Electrical demand, Allocation Energetics, Artificial intelligence, Artificial Neuronal Networks, Modeled in Space of Frequencies, Forecast, Models Arima x Sarima, Arma - Garch Models, Estimation of Number of Harmonicas, Transformed of Fourier.

Clasificación / Classification JEL: C45, Q41

1. Introducción

La energía eléctrica es un recurso esencial que forma parte de las actividades del ser humano, por esto es de especial interés, tanto para las autoridades que regulan el sector eléctrico como para las empresas involucradas en este sector, que el manejo del recurso sea eficiente. Dada la importancia del sector, los elementos que se deben manejar son la planeación, la asignación y la minimización de costos. Esto es necesario para lograr un uso racional del recurso buscando la sustentabilidad (García, 2010).

La planeación, como pilar fundamental, involucra generalmente el pronóstico del nivel de demanda como base para la oferta del sistema y la creación de políticas y normas, logrando de esta manera el óptimo desempeño del sistema; de manera indirecta se busca que los usuarios finales del recurso posean conciencia y educación para su uso.

El Comité Nacional de Despacho de Carga (CNDC) es la institución encargada de la planificación y la operación del Sistema Interconectado Nacional de Bolivia, y el administrador del mercado eléctrico mayorista.

El CNDC fue creado por la Ley N° 1604 (Ley de Electricidad) del 21 de diciembre de 1994. Es una persona jurídica pública, no estatal y sin fines de lucro; su domicilio legal es la ciudad de Cochabamba. Sus actividades, que se desarrollan desde febrero de 1996, estuvieron supervisadas por la Superintendencia de Electricidad hasta abril de 2009; a partir de esa fecha está sujeta a la supervisión de la Autoridad de Fiscalización y Control Social y del Ministerio de Hidrocarburos y Energía.

El CNDC es responsable de coordinar la operación de la generación, transmisión y expansión óptima del Sistema Interconectado Nacional, de realizar el despacho de carga a costo mínimo y de la administración del mercado eléctrico mayorista, de acuerdo con los lineamientos del Ministerio de Hidrocarburos y Energía.

Para alcanzar el propósito de minimización de costos en su actividad de distribución de energía, el CNDC requiere de instrumentos que le permitan lograr pronósticos insesgados y de mínima varianza en intervalos de horas. Estos pronósticos viabilizarían acopiar de las empresas generadoras de energía el requerimiento de la tensión necesaria en sus redes para satisfacer los requerimientos de los centros urbanos y centros productivos.

Con base en lo anteriormente expresado, el objetivo de la presente investigación es proveer de métodos e instrumentos que posibiliten describir el patrón de comportamiento de la demanda, y finalmente el pronóstico.

2. Pronóstico de potencia eléctrica

El pronóstico de la demanda de potencia o carga es fundamental en cualquier problema de toma de decisiones sobre un sistema eléctrico, y es, por tanto, una de las actividades básicas en la planificación. Para estudios de planeamiento de largo plazo, el pronóstico de demanda debe considerar horizontes que pueden variar entre cinco y veinticinco años, dependiendo del horizonte de planeamiento, y puede abarcar un área geográfica a escala local o nacional. La determinación del área geográfica depende de si requiere el planeamiento de generación, transmisión o distribución. Asimismo, el pronóstico de demanda puede referirse a la potencia

pico, a la energía total demandada o al comportamiento de la curva de carga (García y Cabrera, 2003).

En el presente trabajo, la demanda de potencia de corto plazo se refiere a la curva de carga diaria o demanda de potencia horaria, y se plantea para realizar pronósticos a nivel nacional. El pronóstico en el corto plazo de la potencia tiene como objetivo el manejo eficiente y asegurar la operatividad del sistema eléctrico, optimizando el despacho económico horario.

El despacho económico de carga es una de las más importantes funciones dentro del mercado mayorista de electricidad, el cual se debe realizar para garantizar el suministro de energía, maximizando la seguridad del sistema interconectado nacional, y minimizando los precios mayoristas en el mercado horario de energía. Para ello la CNDC elabora el plan de despacho, en el que prevé asignar la producción a los generadores más económicos, según la declaración de costos que éstos hacen al CNDC. Asimismo, dada la naturaleza de la energía eléctrica, que hace que la misma deba ser producida en el preciso momento en que es requerida por los consumidores, debe hacerse un seguimiento continuo, llamado operación en tiempo real, que tiene como finalidad verificar el cumplimiento del programa de despacho y tomar de manera inmediata las acciones necesarias para afrontar las desviaciones que surgen respecto del mismo, tales como el aumento o disminución de la demanda de energía, siempre buscando minimizar los costos de operación y maximizando la seguridad del suministro.

Para llevar a cabo el despacho económico horario, las empresas distribuidoras y comercializadoras de energía deben proporcionar al CNDC el pronóstico de la demanda de potencia diaria de la región a la cual le suministra la carga. Una vez recibidos los pronósticos de demanda de potencia del país y las ofertas de potencia para cada una de las horas del día de las empresas generadoras, el CNDC se encarga de elaborar el programa horario de generación de los recursos del sistema interconectado, bajo criterios de eficiencia económica y técnica.

Se muestra en el Cuadro 1 la participación de las empresas en la satisfacción de demanda por potencia eléctrica, tomado en cuenta las empresas reguladas y no reguladas.

Cuadro 1
Empresas y su participación en el mercado

| Empresa | Promedio / Hora | % |
|----------------------------|-----------------|-------|
| CRE - Santa Cruz | 229.11 | 35.60 |
| ELECTROPAZ - La Paz | 153.62 | 23.87 |
| ELFEC - Cochabamba | 101.54 | 15.78 |
| ELFEC - Chimoré | 4.24 | 0.66 |
| ELFEO - Oruro | 29.66 | 4.61 |
| ELFEO - Catavi | 9.35 | 1.45 |
| CESSA - Sucre | 22.01 | 3.42 |
| SEPSA - Potosí | 23.85 | 3.70 |
| SEPSA - Punutuma | 3.73 | 0.58 |
| SEPSA - Atocha | 6.58 | 1.02 |
| SEPSA - Don Diego | 1.97 | 0.31 |
| SAN CRISTOBAL - C. No Reg. | 42.37 | 6.58 |
| Otros - C. No Regulados | 14.24 | 2.21 |
| Varios (1) | 1.39 | 0.22 |
| TOTAL | 643.66 | |

Fuente: Elaboración propia.

Con base en la descripción de la problemática abordada se procede a plantear la metodología y secuencia de la aplicación, las mismas que se muestran y aplican en los siguientes acápitales.

3. Planteamiento metodológico

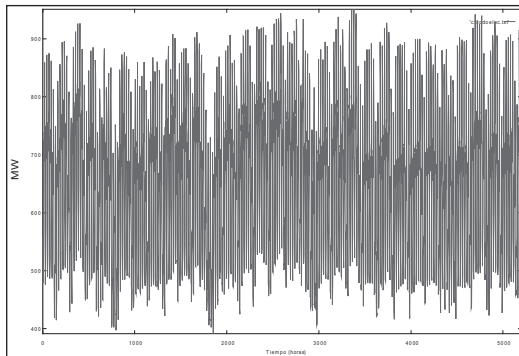
La presente investigación comprende la realización de las siguientes fases o componentes para el logro del objetivo:

- ♦ Acopio de los datos y sistematización
- ♦ Análisis espectral e interpretación de resultados
- ♦ Modelado lineal y análisis de resultados
- ♦ Diagnóstico de no linealidad
- ♦ Modelado no lineal y análisis de resultados
- ♦ Estructuración y entrenamiento de la red neuronal artificial
- ♦ Diagnóstico del mejor experto y pronóstico
- ♦ Análisis de resultados

4. Análisis, modelado y pronóstico de la potencia demandada (horas-día)

Graficar, observar y analizar el comportamiento de los datos es la primera y más importante herramienta en el análisis de series de tiempo. Esto permite concebir la complejidad de la evolución a modelar. Es por esta razón que se inicia el análisis graficando los 5204 datos horarios que conforman la serie real (Gráfico 1); en la misma se muestra el comportamiento de la demanda de potencia total (expresada en MW) abastecida por las diferentes empresas en los meses de diciembre 2009 a julio 2010.

Gráfico 1: Demanda de potencia con datos horarios de 1 de diciembre de 2009 a 6 de julio de 2010



Fuente: Elaboración propia, con base en datos del CNCD

Para realizar el análisis del comportamiento de demanda diario se hace uso del análisis espectral, que comprende dos fases; la primera, el análisis mediante la transformada de Fourier, y la segunda, el modelado mediante modelos no lineales armónicos. El presente análisis se realiza porque en este punto se presume la existencia de ciclos y/o estacionalidades al interior de la serie. Asimismo, se puede afirmar que cada hora se incrementa, en promedio, un 0.002 MW la demanda de potencia.

La transformada de Fourier consiste en transformar los datos del espacio del tiempo al espacio de las frecuencias, resultado que demuestra la existencia de periodicidades o patrones periódicos.

En otras palabras, se trata de muestrear la función cuya transformada se desea conocer, de tal modo que el intervalo del muestreo nos defina la longitud de onda de Nyquist. Esta última debe ser resultado de una estimación de la máxima frecuencia existente en la función buscada.

La estimación empírica de la transformada de Fourier se realiza utilizando las siguientes ecuaciones:

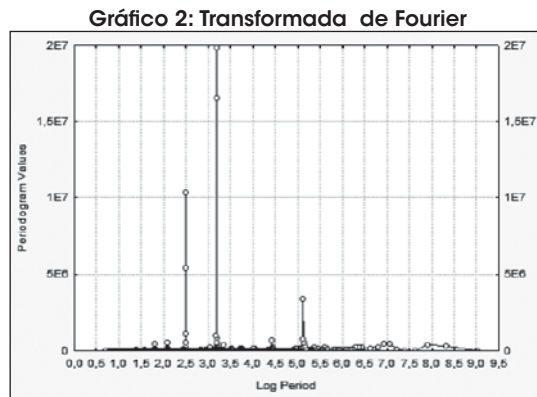
Función par: Sea $f(x)$ una función par, entonces, la transformada de Fourier es:

$$F(\eta) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \cos\left(\frac{2\pi\eta k}{N}\right)$$

Función impar: La función buscada es imaginaria y está dada por:

$$Im[F(\eta)] = - \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \cos\left(\frac{2\pi\eta k}{N}\right)$$

La aplicación de la mencionada transformación se muestra en el Gráfico 2.



Fuente: Elaboración propia.

Con base en los resultados obtenidos que se observan en el Gráfico 2, se menciona que la demanda de potencia, analizada con datos horarios, muestra un comportamiento estacional con por lo menos dos periodicidades diarias y al menos una semanal. Es decir, existen, al interior de la serie, frecuencias significativas correspondientes a las 10 horas, 20 horas y 168 horas. Las dos primeras se explican porque existen dos o más armónicas inmersas durante las 24 horas de demanda de potencia y la tercera corresponde a la existencia de al menos un ciclo semanal en el patrón de consumo.

Dados los resultados obtenidos, se procede a modelar estos patrones cíclicos mediante modelos no lineales armónicos. El análisis armónico corresponde al modelado no lineal con base en la composición de funciones senoidales y cosenoidales, como se expresa de manera formal en la siguiente ecuación:

$$f(x) = A_o + \sum_{j=1}^H A_j \cos(j * x - \beta_j)$$

Donde :

$$0 < x < 2\pi$$

H : número máximo de armónicas

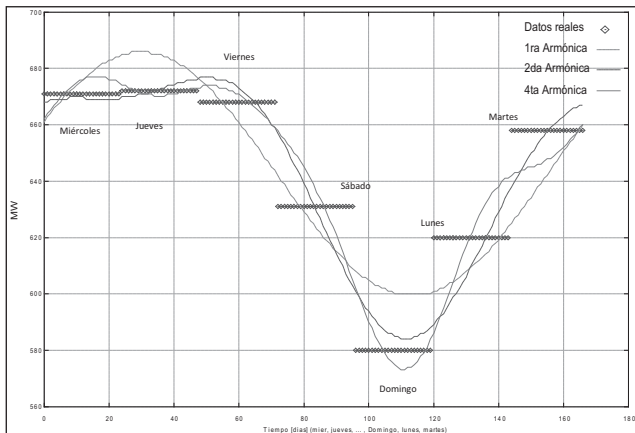
A_j : Amplitud j

B_j : Fase j

A continuación se muestra el modelo generado para los datos promediados diarios (en el siguiente: orden martes, miércoles, jueves, viernes, sábado, domingo y lunes); luego se muestran en el Gráfico 3 los datos reales y estimados por el modelo.

$$H(t) = \frac{1286,26}{2} + 43.13 \cos(t - 1.12) + 15.45 \cos(2t - 5.15) + 7.62 \cos(3t - 2.58) + 4.27 \cos(4t - 1.42)$$

Gráfico 3: Datos reales y estimados (datos diarios)



Fuente: Elaboración propia

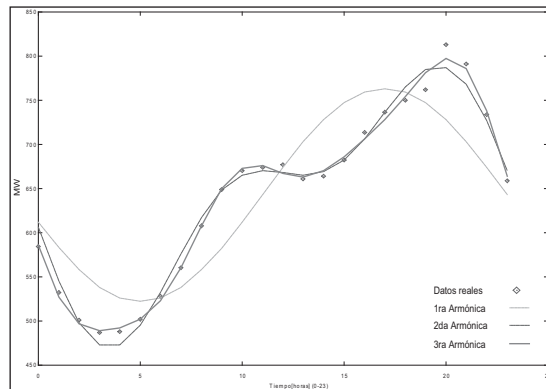
Dados los resultados del modelo, se puede diagnosticar un modelo con segunda armónica con datos promediados semanales. El modelo muestra un máximo consumo los días

miércoles, jueves y viernes, y un mínimo el día domingo. Esto es corroborado por la existencia de una primera amplitud de 43.13 y una segunda de 15.45, con un desfase de -1 y -5.02.

Realizando el mismo análisis para los promedios de demanda de potencia hora-día, se afirma que la mínima demanda promedio se localiza entre las 3 y 4 de la mañana y la máxima de 7 a 8 de la noche; se puede también mencionar que existe un segundo consumo máximo, de 10 a 12 en el mediodía. Esta interpretación se acompaña mediante el modelo estimado y el Gráfico 4.

$$H(t) = \frac{1286.48}{2} + 120.45 \cos(t - 4.45) + 65.39 \cos(2t - 4.62) + 9.75 \cos(3t - 3.27) + 11.5 \cos(4t - 3.62)$$

Gráfico 4: Datos reales y estimados (datos horarios)



Fuente: Elaboración propia

Realizado el análisis espectral, se puede concluir que en la serie temporal se tienen dos componentes cíclicos, uno correspondiente al día y otro a la semana. Los ciclos nos ayudan a comprender que existen demandas diferenciales entre día y noche, fines de semana y semana de trabajo. Patrones más importantes a la hora de realizar los pronósticos.

A continuación se estiman los parámetros para modelos lineales ARIMA (p,d,q) x SARIMA(P,D,Q).

El principio básico del modelado de series de tiempo es la construcción de un “filtro” lineal, el cual genere, por un lado, el modelo del patrón lineal, y, por otro, ruido blanco. Estos modelos tienen la forma:

$$\phi(B)\phi_s(B^s)\nabla^d\nabla_s^D z(t) = \theta(B)\theta_s(B^s)a(t)$$

Donde:

$$\nabla_s^p = (1 - B^s)^p \text{ con } s \text{ como período de variación estacional.}$$

$z(t)$ es la serie modelada.

$a(t)$ es la secuencia de ruido blanco.

$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p$ es el polinomio autorregresivo.

$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q$ es el polinomio MA (moving average)

B es el operador de rezago

$\phi y \theta$ son los parámetros de los modelos

$\nabla = 1 - B$ es el operador diferencia

La ventaja en estos modelos es que la estimación de parámetros es relativamente sencilla, pero su debilidad yace en la adaptabilidad. En general el pronóstico realizado con este tipo de modelos es conservador, porque tienden a la media de manera exponencial y evitan los valores extremos, que son en realidad los que se requiere predecir.

El modelo matemático diagnosticado reemplazando los parámetros estimados es el siguiente¹:

$$y_t = 0.04y_{t-1} - 1.025y_{t-2} + 0.39y_{t-3} - 0.13y_{t-4} + 0.0023y_{t-167} + 0.073y_{t-168} - 0.037\varepsilon_{t-1} - 0.13\varepsilon_{t-2} - 0.036\varepsilon_{t-3} - 0.064\varepsilon_{t-5} - 0.064\varepsilon_{t-6} - 0.04\varepsilon_{t-9} - 0.03\varepsilon_{t-10} - 0.03\varepsilon_{t-22} - 0.36\varepsilon_{t-24} + 0.25\varepsilon_{t-168}$$

| Variable | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|------------|-----------------------|----------|
| AR(1) | 0.404118 | 0.019126 | 21.12914 | 0.0000 |
| AR(12) | -1.024798 | 0.013235 | -77.42967 | 0.0000 |
| AR(13) | 0.393548 | 0.018467 | 21.31047 | 0.0000 |
| AR(24) | -0.132113 | 0.012534 | -10.54063 | 0.0000 |
| AR(167) | 0.023032 | 0.003543 | 6.501150 | 0.0000 |
| AR(168) | 0.072787 | 0.007073 | 10.29150 | 0.0000 |
| MA(1) | -0.037051 | 0.017895 | -2.070441 | 0.0385 |
| MA(2) | -0.130150 | 0.012788 | -10.17727 | 0.0000 |
| MA(3) | -0.035564 | 0.012669 | -2.807152 | 0.0050 |
| MA(5) | -0.064489 | 0.012452 | -5.178915 | 0.0000 |
| MA(6) | -0.064176 | 0.012459 | -5.151050 | 0.0000 |
| MA(9) | -0.040008 | 0.011981 | -3.339257 | 0.0008 |
| MA(10) | -0.032691 | 0.012221 | -2.674968 | 0.0075 |
| MA(22) | -0.029777 | 0.012141 | -2.452617 | 0.0142 |
| MA(24) | -0.364321 | 0.013953 | -26.11054 | 0.0000 |
| MA(168) | 0.251298 | 0.012387 | 20.28726 | 0.0000 |
| R-squared | | 0.958656 | Mean dependent var | 0.026837 |
| Adjusted R-squared | | 0.958533 | S.D. dependent var | 61.44531 |
| S.E. of regression | | 12.51244 | Akaike info criterion | 7.894504 |
| Sum squared resid | | 783902.0 | Schwarz criterion | 7.915279 |
| Log likelihood | | -19811.05 | Durbin-Watson stat | 1.992859 |

Las estimaciones se realizan con datos que poseen una desintegración de primer orden y otra de orden 24 estacional, la misma que se empleó con base en la información del análisis espectral.

El modelo muestra básicamente el componente estacional, el cual se demuestra mediante los parámetros correspondientes al modelo SARIMA.

Luego de realizado el modelado lineal se pasa a buscar patrones no lineales, para lo cual se hace uso de la prueba dada por Brock, el cual por su robustez es utilizado para detectar patrones de comportamiento no lineal.

La presente prueba contrasta la hipótesis nula de independencia e idénticamente distribuidas para series de tiempo $x(t)$ mediante el uso de la correlación espacial. Para examinar esta correlación espacial, la serie de tiempo debe llevarse a un m -espacio, para construir el siguiente vector:

$$x^m(t) = [x(t), \dots, x(t - m + 1)] \\ t = 1, 2, \dots, T - m + 1$$

En este caso, la transformación a diferentes espacios o dimensiones crea nuevos vectores en sus respectivas dimensiones. Así, esta transformación permite tomar datos de la serie temporal y transformarlos a un espacio dimensional superior. La motivación detrás de esto es examinar la correlación en un contexto hiperespacial.

La dependencia de $x(t)$ es examinada a través del concepto de correlación integral, una medida que examina las distancias entre puntos, mediante una transformación en una dimensión m dada, para diferentes dimensiones. Para cada una de las dimensiones de transformación m se elige un ϵ , con cuyos datos la correlación integral está definida por:

$$C(\xi, m, T) = [T_m(T_m - 1)]^{-1} \sum_{t \neq s} I[x^m(t), x^m(s); \xi]$$

donde: $T_m = T - m + 1$, t y s tienen rango de 1 a $T - m + 1$ en la sumatoria y son restringidos tal que $t \neq s$.

Los resultados de la aplicación de la prueba² demuestran la existencia de patrones no lineales inmersos en el conjunto de datos, por lo cual se inicia el modelado mediante modelos no lineales ARMA - GARCH y luego mediante modelos de Redes Neuronales Artificiales.

Los modelos ARCH y GARCH, denominados así por su nombre en inglés, *Generalized Autoregressive Conditionally Heteroscedastic*, representan procesos con media condicional igual a cero. Sin embargo, también se puede considerar procesos dependientes de la media denominados ARMA-GARCH. En este tipo de modelos se puede considerar un modelo simple de regresión lineal con errores GARCH, que se expresa formalmente de la siguiente manera:

$$y_t = \mu_t \text{ donde } \mu_t \text{ es un GARCH}$$

Un modelo ARMA con errores GARCH se expresa de la siguiente manera:

$$\phi(L)y_t = \theta(L)\mu_t \text{ donde } \mu_t \text{ es un GARCH}$$

Finalmente, un proceso GARCH se define como:

$$V(y_{t-1}) = \sigma_t^2 = c + \sum_{i=1}^q a_i y_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^p \beta_j \sigma_{t-j}^2$$

| | | | | | | |
|---|------------------------|---------------|------------|--------------|--------------|----------------|
| 2 | Dimension | BDS Statistic | Std. Error | z-Statistic | Prob. | |
| | 2 | 0.038136 | 0.001464 | 26.04885 | 0.0000 | |
| | 3 | 0.065340 | 0.002328 | 28.06438 | 0.0000 | |
| | 4 | 0.077445 | 0.002775 | 27.90644 | 0.0000 | |
| | 5 | 0.080228 | 0.002896 | 27.70547 | 0.0000 | |
| | 6 | 0.080847 | 0.002796 | 28.91530 | 0.0000 | |
| | Raw epsilon | | 13.95266 | | | |
| | Pairs within epsilon | | 17757145 | V-statistic | 0.703796 | |
| | Triples within epsilon | | 6.93E+10 | V-statistic | 0.547204 | |
| | Dimension | C(m,n) | c(m,n) | C(1,n-(m-1)) | c(1,n-(m-1)) | c(1,n-(m-1))^k |
| | 2 | 6723891. | 0.533315 | 8871927. | 0.703689 | 0.495179 |
| | 3 | 5213826. | 0.413707 | 8867669. | 0.703632 | 0.348367 |
| | 4 | 4062629. | 0.322490 | 8863442. | 0.703577 | 0.245045 |
| | 5 | 3180464. | 0.252565 | 8859178. | 0.703519 | 0.172337 |
| | 6 | 2543077. | 0.202029 | 8854923. | 0.703461 | 0.121183 |

Los parámetros estimados para el modelo muestran que es significativa la dependencia sobre las varianzas rezagadas y que el modelo es diagnosticado de manera adecuada³.

Siguiendo con la metodología planteada, se procede al modelado mediante modelos de redes neuronales artificiales que conforman un componente del conjunto denominado sistemas expertos.

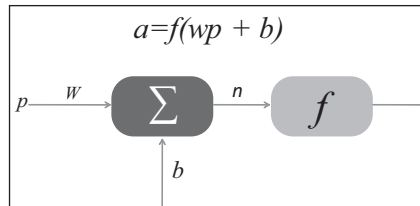
Basados en la eficiencia de los procesos llevados a cabo por el cerebro, e inspirados en su funcionamiento, varios investigadores han desarrollado desde hace más de 30 años la teoría de las Redes Neuronales Artificiales (RNA), las cuales emulan las redes neuronales biológicas, y que se han utilizado para aprender estrategias de solución basadas en ejemplos de comportamiento típico de patrones; estos sistemas no requieren que la tarea a ejecutar se programe, ellos generalizan y aprenden de la experiencia.

| 3 | Coefficient | Std. Error | z-Statistic | Prob. | |
|--------------------|-------------|------------|-----------------------|--------|-----------|
| Y2(-1) | 0.245118 | 0.018213 | 13.45851 | 0.0000 | |
| Y2(-2) | -0.068700 | 0.023435 | -2.931552 | 0.0034 | |
| Y2(-11) | -0.053469 | 0.011811 | -4.527208 | 0.0000 | |
| Y2(-12) | -0.963281 | 0.003737 | -257.7767 | 0.0000 | |
| Y2(-13) | 0.258402 | 0.017795 | 14.52073 | 0.0000 | |
| Y2(-14) | -0.066065 | 0.021821 | -3.027634 | 0.0025 | |
| Y2(-23) | -0.067217 | 0.011508 | -5.841086 | 0.0000 | |
| AR(1) | 0.104792 | 0.010642 | 9.847363 | 0.0000 | |
| AR(12) | -0.074338 | 0.008940 | -8.315252 | 0.0000 | |
| AR(24) | 0.100902 | 0.008011 | 12.59499 | 0.0000 | |
| AR(167) | 0.100409 | 0.005741 | 17.48880 | 0.0000 | |
| AR(168) | 0.635927 | 0.008999 | 70.66299 | 0.0000 | |
| MA(2) | -0.036464 | 0.015925 | -2.289690 | 0.0220 | |
| MA(5) | -0.032032 | 0.009956 | -3.217344 | 0.0013 | |
| MA(6) | -0.039780 | 0.010619 | -3.746263 | 0.0002 | |
| MA(10) | -0.033155 | 0.009619 | -3.446892 | 0.0006 | |
| MA(22) | -0.028756 | 0.007318 | -3.929375 | 0.0001 | |
| MA(24) | -0.653716 | 0.010430 | -62.67371 | 0.0000 | |
| MA(168) | -0.114909 | 0.008228 | -13.96572 | 0.0000 | |
| Variance Equation | | | | | |
| C | 3.311026 | 0.184472 | 17.94865 | 0.0000 | |
| RESID(-1)^2 | 0.118594 | 0.004841 | 24.49646 | 0.0000 | |
| GARCH(1) | 0.865122 | 0.004596 | 188.2165 | 0.0000 | |
| R-squared | | 0.961798 | Mean dependent var | | -0.024060 |
| Adjusted R-squared | | 0.961637 | S.D. dependent var | | 61.45771 |
| S.E. of regression | | 12.03737 | Akaike info criterion | | 7.441730 |
| Sum squared resid | | 721303.2 | Schwarz criterion | | 7.470406 |
| Log likelihood | -18582.32 | | Durbin-Watson stat | | 2.089618 |

Las redes neuronales artificiales son modelos matemáticos no lineales inspirados por el sistema nervioso biológico, que simulan el proceso de aprendizaje del ser humano. Se utilizan principalmente para la clasificación y predicción de datos y variables. En lo que respecta a su uso en predicción, a diferencia de los modelos clásicos de regresión, la magnitud de los coeficientes para cada nodo o neurona no son importantes, esto porque no se puede esperar coherencia en sus signos; lo importante es el ajuste del modelo. Estos pesos, que expresan finalmente el conocimiento y capacidad de inferencia, deben estimarse mediante algún método de optimización no lineal. Éste finalmente definirá el tipo de aprendizaje que se desea utilizar.

El modelamiento de la neurona biológica es relativamente sencillo. Se compone de una entrada p , un valor de peso w , un *bias* b (este valor tiene como justificación que permite que la neurona artificial mueva su frontera de decisión, que es una recta, de tal forma que no pase por el origen), una función de suma Σ , una función de activación f y una salida a :

Gráfico 5: Esquema de la neurona artificial



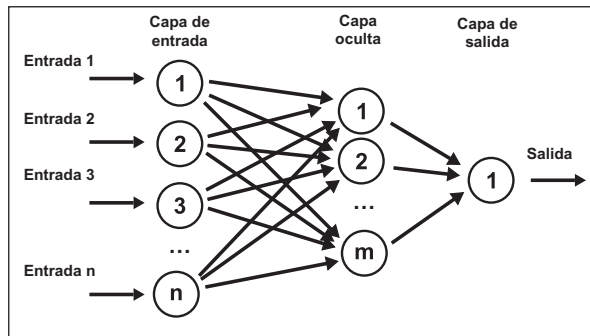
Fuente: Elaboración propia

El Gráfico 5 muestra la representación de una neurona artificial; muchas de estas neuronas interconectadas forman una red neuronal. Se aprecia que la única entrada del exterior es p , el cual se multiplica con un valor específico de cada neurona w (peso); éstos son llevados a una sumatoria con otro valor propio de la neurona, denominado b . El valor resultante se lleva a través de f (función de activación o de transferencia), de donde sale el valor resultante, que es transmitido a la siguiente neurona o al exterior.

De acuerdo al número y a la distribución de las neuronas artificiales, ellas conforman capas o niveles. Capa o nivel es el conjunto de neuronas cuyas entradas provienen de la misma fuente (que puede ser otra capa de neuronas) y cuyas salidas se dirigen al mismo destino (que puede ser otra capa de neuronas).

Una red neuronal artificial es la interconexión de varias neuronas. El Gráfico 6 muestra una red neuronal estructurada en capas; es una de las estructuras en las cuales se pueden asociar las neuronas. En este sentido, los parámetros fundamentales de la red son: el número de capas, el número de neuronas por capa y el tipo y número de conexiones entre neuronas. No existe un método o regla que determine el número óptimo de neuronas ocultas para resolver un problema dado, generalmente se determinan por prueba y error, es decir, partiendo de una arquitectura ya entrenada, se realizan cambios aumentando y disminuyendo el número de neuronas ocultas y el número de capas, hasta conseguir la arquitectura que se ajuste a la solución del problema.

Gráfico 6: Red neuronal multicapa típica



Fuente: Elaboración propia

Luego de conformar el esquema de la red neuronal, se procede a la etapa de aprendizaje de la red. El aprendizaje es el proceso por el cual una red neuronal modifica sus pesos en respuesta a una información de entrada. Los cambios que se producen durante el proceso de aprendizaje se reducen a la destrucción, modificación y creación de conexiones entre las neuronas. En el caso de las redes neuronales artificiales, se puede considerar que el conocimiento se encuentra representado en los pesos de las conexiones. En realidad puede decirse que se aprende modificando los valores de los pesos de la red. Durante el proceso de aprendizaje, los pesos de las conexiones de la red sufren modificaciones, por tanto, se puede afirmar que este proceso ha terminado (la red ha aprendido) cuando los valores de los pesos permanecen estables. En forma general, se consideran dos tipos de aprendizaje: supervisado y no supervisado. La diferencia fundamental entre ambos tipos estriba en la existencia, o no, de un agente externo (supervisor) que controle el proceso de aprendizaje de la red.

Por lo general las redes neuronales aprenden por medio de ejemplos, los cuales comúnmente se presentan a la red en patrones de entrada y salida. El objetivo del aprendizaje o entrenamiento de la red es ajustar los parámetros de la red, pesos y umbrales, con el fin de que las entradas presentadas produzcan las salidas deseadas, es decir con el fin de minimizar la función de error.

De manera formal, existen dos categorías de algoritmos de aprendizaje: el descenso por gradiente, y técnicas de entrenamiento de segundo orden (gradiente conjugado, Levenberg-Marquardt -LM). Todos los algoritmos parten de una condición inicial x_0 y luego se modifican por etapas, de acuerdo con: $X_{k+1} = X_k + \alpha P_k$

donde p_k representa una dirección de búsqueda y el escalar positivo α es la tasa de aprendizaje que determina la longitud del paso. El entrenamiento finaliza cuando una de las siguientes condiciones se presenta:

- ♦ Cuando se ha alcanzado la cantidad máxima de iteraciones.
- ♦ Cuando se ha alcanzado el error final deseado.
- ♦ Cuando la ejecución del gradiente alcanza un valor por debajo del mínimo gradiente.

Las RNA se han empleado para resolver numerosos problemas, entre ellos, los económicos y financieros, destacando en gran medida su aplicación en la predicción de series temporales y su capacidad para detectar y explotar la no-linealidad existente en los datos, aun en condiciones en las existen datos incompletos o la presencia de ruido. También se destacan por su desempeño en la solución de problemas complejos, en los cuales el reconocimiento de modelos o comportamientos es importante. Su uso resulta especialmente útil en la modelización de aquellos fenómenos complejos en los cuales la presencia de relaciones no lineales entre las variables es habitual. La aplicación de este tipo de técnicas en el terreno de la economía ha proporcionado interesantes resultados, sobre todo en los campos de la teoría económica y la econometría. El gran aporte de esta metodología consiste precisamente en la eliminación de la hipótesis reduccionista de linealidad, que ha venido dominando el análisis económico a lo largo de su historia. Si bien dicha hipótesis simplificadora ha permitido formular modelos matemáticos con los que explicar el fenómeno económico, al no contemplar la no linealidad inherente a los sistemas económicos, dichos modelos ofrecían una visión parcial de la realidad. Desde el punto de vista de la econometría, principal herramienta de análisis y validación con la que cuenta el economista, no podemos olvidar que una de las hipótesis fundamentales sobre las que se construye el ya clásico Modelo Lineal Básico es, como su

propio nombre indica, la linealidad de las ecuaciones. El empleo de técnicas econométricas sustentadas en una falsa linealidad ha conducido a la especificación de modelos incompletos, los cuales mostraban sus carencias al enfrentarse a fenómenos de dinámica no lineal.

El tipo de red neuronal utilizado en el presente trabajo es el Perceptrón Multicapa; cabe aclarar que no se utiliza la red neuronal de base radial por motivos de capacidad de inferencia y ajuste del mismo.

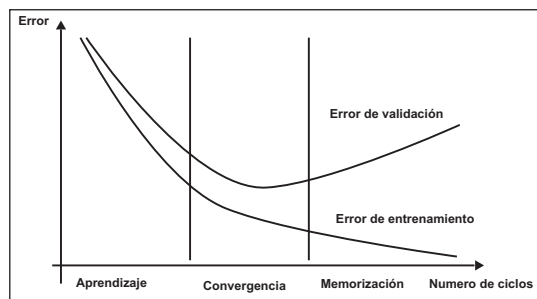
Se muestra a continuación el proceso de construcción de los modelos de redes neuronales, el cual consta de las siguientes etapas

- ♦ Normalización de datos
- ♦ Selección de variables de entrada.
- ♦ Estimación de los parámetros de los modelos

Las mencionadas etapas son exigidas por la metodología para un adecuado modelado y posterior pronóstico.

La sección que se describe a continuación debería ubicarse después del pronóstico, pero por razones de metodología se antepone a la del pronóstico, para mostrar los parámetros estimados. Esta estimación es resultado de un proceso de búsqueda del mínimo. Este mínimo resulta de la adecuada combinación de diferentes parámetros, proceso computacionalmente muy costoso pero en cuya búsqueda se pueden utilizar algoritmos genéticos. Este proceso se puede observar en el Gráfico 7, en el cual se trata de lograr convergencia mediante la minimización tanto de errores de entrenamiento como de validación.

Gráfico 7: Búsqueda del mínimo en un diagrama de errores



Fuente: Elaboración propia

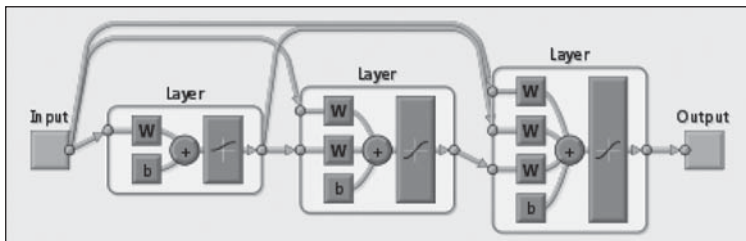
Los parámetros seleccionados se muestran en el Cuadro 1. En el Gráfico 8 se muestra la estructura utilizada para el modelo de pronóstico de demanda de potencial eléctrico.

Cuadro 2
Datos de parámetros para la red neuronal

| Descripción | Valores |
|---|-------------|
| Número de entradas N. | 10 |
| Número de salidas J. | 1 |
| Número de capas escondidas C. | 2 |
| Número de neuronas en cada capa. Ne. | 19 y 7 |
| Función de aprendizaje. | LM |
| Error objetivo | 0.001 |
| Tasa de aprendizaje | 0.05 |
| Número máximo de ciclos. | 50 |
| Horizonte de pronóstico* | 93 |
| Función de los neurodos de la capa oculta | Tansig, log |
| Función de salida | Purelin |

* El horizonte de pronóstico fue extremo, con el fin de probar los modelos.

Gráfico 8: Estructura de la RNA para pronostico de potencial

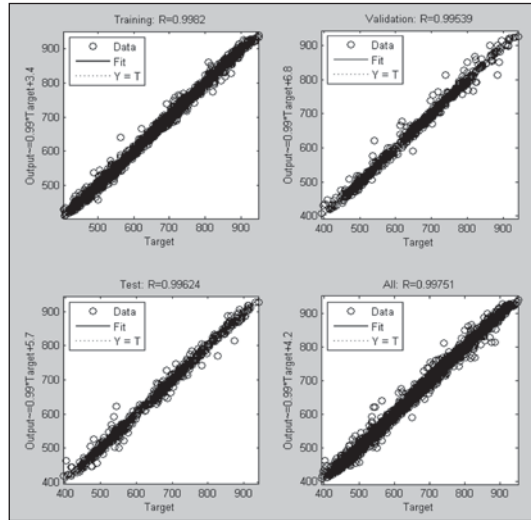


Fuente: Elaboración propia

El último paso es poner la red neuronal optimizada en producción. Esto depende en gran medida del software que se esté utilizando y el entorno en que se encuentran los datos. En el presente estudio se utilizó la herramienta de MatLab referente a redes neuronales.

El Gráfico 9 muestra el ajuste logrado por la red neuronal artificial en las fases de entrenamiento (0.996), validación (0.995) y prueba (0.994).

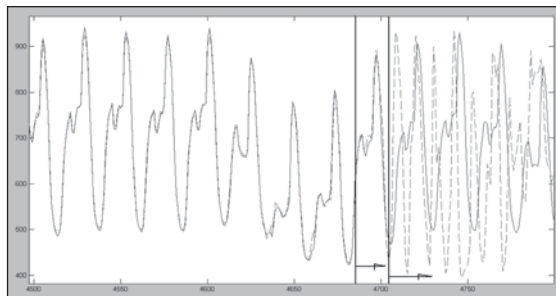
Gráfico 9: Ajuste logrado por la RNA en las diferentes fases



Fuente: Elaboración propia

El pronóstico generado por la red neuronal para estimar datos futuros se muestra en el Gráfico 8, donde se puede apreciar que el pronóstico realizado es muy próximo a los datos reales. Esto se puede afirmar mediante los indicadores de MAE de 6 y MAPE de 0.0096⁴.

Gráfico 10: Resultados del pronóstico de demanda de potencia



Fuente: Elaboración propia

⁴

$$MAE = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad MAPE = \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right|$$

| Modelo | MAE | MAPE |
|-----------------|--------|-------|
| Lineal | 15,457 | 0,665 |
| No Lineal | 9,801 | 0,557 |
| Neural Networks | 6,000 | 0,010 |

Se debe mencionar que la generalización de la red está influenciada por tres factores: el tamaño y eficiencia del conjunto de aprendizaje, la arquitectura de la red y la complejidad del proceso evolutivo del fenómeno, en este caso la demanda de potencia. Utilizar un conjunto de aprendizaje pequeño no resulta, necesariamente, en una mejor capacidad de predicción, pues este sobreaprendizaje hace que la red memorice detalles de la serie de tiempo, en vez de aprender la relación esencial entre los datos de entrada y salida. Para asegurar la apropiada generalización de la red, el modelo matemático debe ser validado bajo condiciones extremas. Esto se logra con un conjunto de datos que no hayan sido utilizados para el aprendizaje y son utilizados para la evaluación del modelo. Con estas recomendaciones se finaliza el análisis y modelado de la presente investigación.

5. Conclusiones

En el presente trabajo se estimaron básicamente cuatro modelos, los mismos que no son mutuamente excluyentes sino, más bien, complementarios. Esta afirmación se la realiza porque cada modelo captura ciertas características de la serie en estudio. Empero, la que mejores resultados muestra, dadas las características descritas de la serie, es el modelo matemático obtenido del entrenamiento una red neuronal artificial. Este modelo tiene un ajuste del 99 por ciento y un MAE y MAPE menores a los otros modelos.

Desde la perspectiva económica, se concluye que cualquier mejora en la disminución del error de pronóstico representa una mejora en el excedente del consumidor. El beneficio económico por la implementación de los modelos de redes neuronales artificiales en la predicción de la demanda de potencia eléctrica se presenta por la reducción de los costos incrementales generados por el error de pronóstico. Dichos costos adicionales se pueden producir en un primer escenario porque el pronóstico de la demanda de potencia sea superior al valor real, entonces el precio de generación de la potencia demandada es alto porque éste se halla con base en el costo de la última unidad generada para compensar el pronóstico de la demanda. El segundo escenario en el cual el pronóstico de la demanda es menor o inferior a la demanda real implica la disminución en la calidad de prestación del servicio en un mercado regulado por un sistema de calidad-penalidad.

El despacho y la operación en tiempo real están concebidos con el objetivo de reducir el exceso o déficit de carga que ocurrirían por el error del pronóstico. Cuando, durante el transcurso del día, se observa que el pronóstico de la demanda de potencia para la hora h

con la cual se programó el despacho económico puede ser significativamente más alto que la demanda real en la hora h , mediante la actividad del despacho se permite que las empresas distribuidoras adviertan al CNDC esta situación, y se altere la programación inicial de despacho de carga. Mediante la operación en tiempo real se optimiza la actividad operativa, de tal manera que la generación total de carga compense la demanda real. Si se aprecian caídas en las tensiones locales porque el despacho de carga es inferior a la demanda real, el CNDC debe coordinar las actividades para que se aumente la producción de los generadores y se pueda despachar el déficit de carga. De esta forma se minimizan las pérdidas en cuanto a que la cantidad de potencia comprada corresponda a la que realmente se consume.

Con respecto al precio, con base en lo anterior, se puede mencionar que, a mayor exactitud y precisión en los pronósticos, las empresas no se ven perjudicadas por la disminución del costo unitario reflejada en la tarifa, porque sus ingresos representados dentro del costo unitario por distribución y comercialización siguen siendo los mismos. Sin embargo, como comercializadora puede obtener una mejora en el bienestar, porque al disminuir el costo unitario por prestación de servicio se supone un aumento en el consumo.

Artículo recibido en: agosto de 2010

Manejado por: ABCE

Aceptado en: marzo de 2011

Referencias

1. García, A. (2010). *Introducción a la regresión armónica dinámica. Análisis y predicción de la coyuntura económica*. Universidad Complutense de Madrid.
2. García, D. y A. Cabrera (2003). *Predicción de la demanda eléctrica de corto plazo mediante redes neuronales artificiales*. SIE. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería. Universidad de Guadalajara, México.
3. Gobierno de Bolivia. (1994). Ley de electricidad N° 1604 de 21 de diciembre de 1994. Reglamentos aprobados por D.S. N° 24043 de 28 de junio de 1995.
4. Gonzales, V. (2007). “Un modelo Spline para pronóstico de la demanda de energía eléctrica”. Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística, Facultad de Ingenierías, Universidad del Valle, Cali, Colombia
5. Mallo, C. (2007). “Predicción de la demanda eléctrica horaria mediante redes neuronales artificiales”. Departamento de Economía Cuantitativa. Universidad de Oviedo.
6. Martinic, N. Gamma. (2008). “Ray Astrophysics, Chacaltaya Cosmic Rays Observatory”. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
7. Mendoza, J. (2006). “Pronóstico de carga a corto plazo utilizando redes neuronales artificiales”. *Scientia et Technica*, Universidad Tecnológica de Pereira - Colombia
8. Pérez, S. y F. Garbati. (2008). Modelo matemático para la demanda de potencia. Universidad Nacional de Colombia. Red de Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal. Redalyc.
9. Mallo, C. (2008). “Predicción de la demanda eléctrica horaria mediante redes neuronales artificiales”. Departamento de Economía Cuantitativa. Universidad de Oviedo.
10. Sante, R. (2009). “Transformada rápida de Fourier”. Departamento de Economía Cuantitativa. Universidad Complutense de Madrid
11. Tabares, H. y J. Hernández (2008). “Mapeo de curvas típicas demanda de energía eléctrica del sector residencial, comercial e industrial de la ciudad de Medellín, usando redes neuronales artificiales y algoritmos de interpolación”. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.

12. Villada, F, D.R. Cadavid y J.D. Molina (2008) .“Pronóstico del precio de la energía eléctrica usando redes neuronales artificiales”. Grupo de manejo eficiente de la energía (GIMEL), Universidad de Antioquia, A.A. 1226, Medellín, Colombia. Redalyc.

Anexo 1: Simulación de series autorregresivas integradas con medias móviles de orden superior

Cada serie autoregresiva de primer orden, denominada $AR(1)$, se puede comenzar con un parámetro, que se denomina ϕ_1 . La condición de serie autoregresiva estacionaria está dada por $-1 < \phi_1 < +1$:

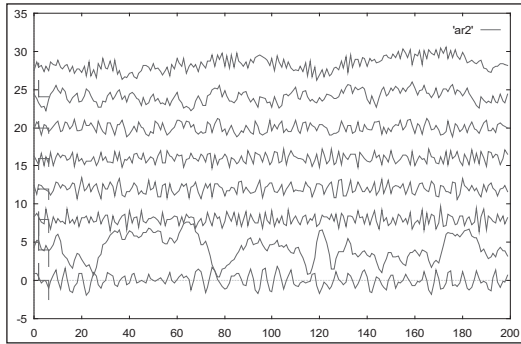


Figura A.1. Varias series autorregresivas de primer orden.
El parámetro que induce las series ha sido encontrado al azar.

En la figura A.1 se muestran algunos fragmentos simulados de series $ARIMA(p,d,q)$. Se ha utilizado ruido blanco para generar las series temporales. El σ de la serie aleatoria se ha tomado como 1.

Se puede observar que cuando las autocorrelaciones oscilan, entonces la serie temporal simulada tiende también oscilar con una frecuencia cercana a la frecuencia de Nyquist.

En la figura A.3 se puede ver la potencia espectral de las series temporales simuladas en la figura A.1. Nótese que las coordenadas están en escala log-log. El rango de las frecuencias en la figura A.3 corresponde al rango comprendido desde un valor cercano a cero hasta la frecuencia de Nyquist, esto es, 0.5 en escala del inverso de la escala del muestreo para las series temporales con un intervalo de muestreo dado.

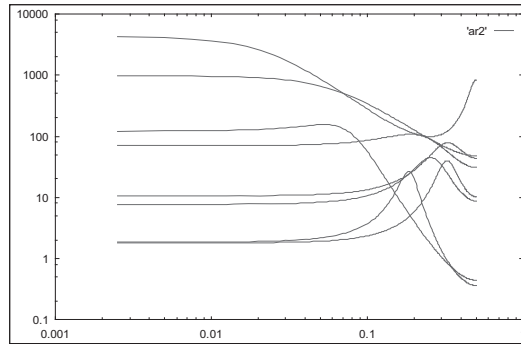


Figura A.2. Densidades espectrales correspondientes a los de la figura A.1.

Como regla general, en la potencia espectral, ya sea que posea una función decreciente o no, cuando la serie temporal varía en forma suave o bien es una función creciente, la serie temporal oscila entre un valor y el siguiente.

En cuanto a las series autoregresivas de orden superior, es decir, cuando $p > 2$, $d > 2$, y $q > 2$, que se muestran en la Figura A.3, los parámetros se encuentran dentro del triángulo de estacionariedad. Esas condiciones implican que los valores para los coeficientes ϕ_1 y ϕ_2 se encuentren al interior o sobre la frontera del triángulo de estacionariedad. A esto se suma que existen diferentes perfiles de las series temporales cuando los parámetros se encuentran en una de las cuatro zonas limitadas por la parábola $-0.25 \times \phi_1^2$ y la línea $\phi_1 = 0$. En todos los casos se trata ya sea de comportamiento de exponenciales atenuados o bien de funciones sinusoidales atenuados. Es conveniente simular estas series temporales para estudiar la clasificación de estos perfiles. Desde el punto de vista algebraico, buscar estos comportamientos es equivalente a obtener raíces de un polinomio. Cuando dichas raíces son reales, entonces se trata de perfiles de exponenciales atenuados; caso contrario, cuando son complejos, entonces se trata de sinusoidales atenuados.

Finalmente, en la Figura A.4 se aprecian las potencias espectrales para cada una de las series autorregresivas integradas de medias móviles. Tanto en la figura A.2 como en la A.4, cada potencia espectral se multiplicó por 2^n , donde n va desde 0 hasta 19, para evitar que las potencias espectrales se confundan entre sí. La obtención de la potencia espectral es a través de la convolución del ruido y el espectro del proceso lineal.

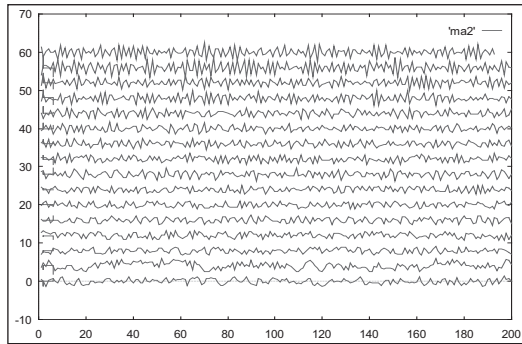


Figura A.3. Simulación de 20 series temporales mediante la aplicación para generar series temporales autoregresivas integradas con media móvil de orden superior.

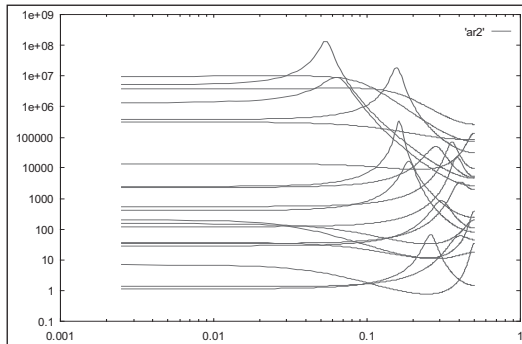


Figura A.4. Densidades espectrales correspondientes a los de la Figura A.3.

De las potencias espectrales obtenidas se puede mencionar que las series autoregresivas y de medias móviles integradas poseen un espectro relativamente constante, excepto cuando aparecen oscilaciones cerca de la frecuencia de Nyquist.

Para las series autoregresivas de medias móviles integradas de orden superior las Figuras A.1 y A.3 se muestran las series temporales generadas con los coeficientes que cumplen que: $-1 < \phi < +1$ y $\theta < |1|$

Aquí vale la pena mencionar la manera teórica de obtener la potencia espectral de las series simuladas. Básicamente se reemplaza en una función entera de operadores la expresión $e^{(i2\pi f)}$ por cada operador, y se obtiene sacando módulos al cuadrado, funciones enteras en $\cos(2\pi n f)$ con n algún número entero. Por supuesto que se tiene otra manera de comprobar esto, y es obteniendo la transformada de Fourier digital de las series ARIMA(p, d, q) de entrada.

Anexo 2: Simulación con modelos armónicos

En los análisis modernos de la teoría de la información perteneciente a la ingeniería de sistemas, en el espacio de la frecuencia se utiliza la transformada de Fourier digital, haciendo uso del teorema del muestreo. Es decir, tratamos de muestrear la función cuya transformada deseamos conocer, de tal modo que el intervalo del muestreo L sea lo suficientemente pequeño como para que dos de esas muestras nos definan la longitud de onda de Nyquist. De esa manera esta última definirá la máxima frecuencia existente en la función buscada.

Si se desea encontrar en forma numérica las transformadas digitales, las ecuaciones:

$$F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \cos\left[\frac{2\pi nk}{N}\right]$$

$$I_m[F(n)] = -\sum_{k=0}^{N-1} f(k) \sin\left[\frac{2\pi nk}{N}\right]$$

permiten estimar y mostrar los comportamientos a corto y largo plazo, mediante la función par e impar.

Lo anterior se puede expresar de mejor manera para su aplicación como:

$$C(i) = 0.5A(0) + \sum_{j=1}^{M-1} A(j) \cos\left(\frac{\pi}{M} ji\right) + 0.5A(M) \cos(\pi i)$$

El problema central de la simulación correspondiente a la presente sección corresponde a generar series artificiales con base en un modelo cuyos parámetros fueron estimados previamente. Para lograr este objetivo se utiliza el siguiente modelo, que escrito de manera general se denota como:

$$f(x) = A_0 + \sum_{j=1}^H A_j \cos(j^* x - \beta)$$

Donde:

$$0 < x < 2\pi$$

H : número de armónica

A_j : es la amplitud j

β_j : es la fase j

En la anterior ecuación se expresan las combinaciones complejas que muestran las periodicidades de un periodo real contenido en una serie temporal. De este modo se ajusta

a un modelo matemático. Esto es importante, sobre todo para generar series temporales mediante la simulación.

Para el análisis de las series temporales, por ejemplo correspondientes a la variabilidad climática, cada uno de los factores climáticos día a día se somete al análisis armónico, pues para que la transformada de Fourier detecte la frecuencia se requieren muchos más ciclos en la serie temporal. Para este fin se simula el comportamiento con la primera, segunda y cuarta armónica; de esta manera se obtiene un comportamiento representativo de los factores climáticos y se conoce si estas series son o no estacionales.

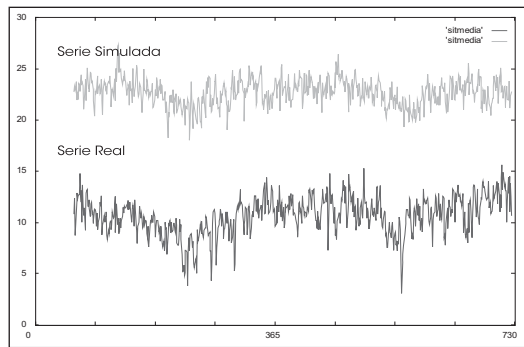


Figura A.5. Simulación de 730 datos

En la Figura A.5 se muestra la simulación, con las correspondientes armónicas que la posibilitaron, y los correspondientes parámetros del modelo matemático de comportamiento expresado en el primer modelo matemático.

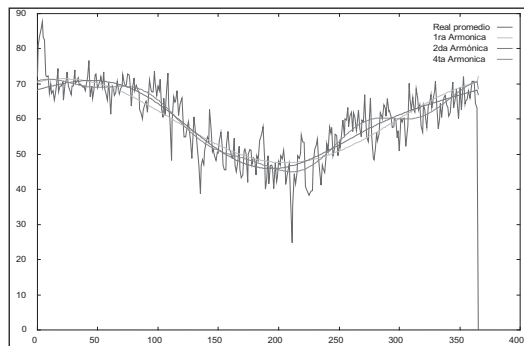


Figura A.6. Simulación con 4 armónicas de una serie de tiempo

Anexo 3: Simulación con modelos ARMA-GARCH

La finalidad de un modelo no es, naturalmente, reproducir la realidad en toda su complejidad, sino captar formalmente lo que es esencial para comprender algún aspecto de su estructura o comportamiento.

En el presente caso se simulan series que corresponden a los modelos ARMA-GARCH. La simulación que se realiza muestra datos que poseen las mismas características matemáticas, estadísticas y físicas que la serie original o real que se modela. Estas series deben aproximarse tanto como sea posible a la serie inicial. La aplicabilidad de estas series artificiales se muestra en la creación de datos para analizar diferentes escenarios, y para completar series de datos incompletas y otros que puedan presentarse.

En la Figura A.7 se muestran series ARMA-GARCH simuladas. En tales gráficos se podrán observar la serie original en la parte inferior y las series simuladas en las series que se grafican en la parte superior.

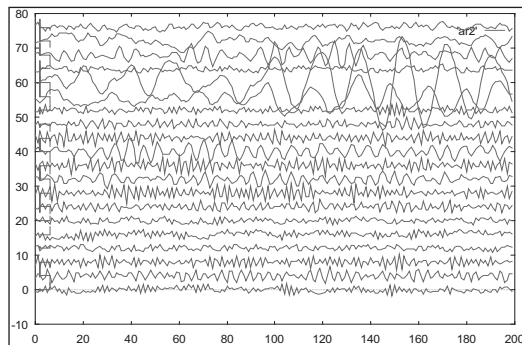


Figura A.7. Series ARMA-GARH simulados.

En la Figura A.8 se muestra el espectro de las series simuladas, las mismas que muestran que superan la frecuencia de Nyquist.

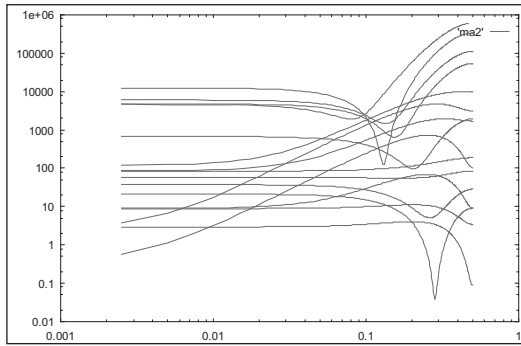


Figura A.8. Densidades espectrales correspondientes a la Figura A.7.

Anexo 4: Aspectos importantes de las redes neuronales artificiales

Estructura y aprendizaje de la red de propagación hacia atrás

En la red de la Figura A.9 se muestra una capa de entrada con n neuronas y una capa de salida con m neuronas y al menos una capa oculta de neuronas internas. Cada neurona de una capa recibe entradas de todas las neuronas de la capa anterior y envía su salida a todas las neuronas de la capa posterior. No hay conexiones hacia atrás, denominadas *feedback*, ni laterales entre neuronas de la misma capa.

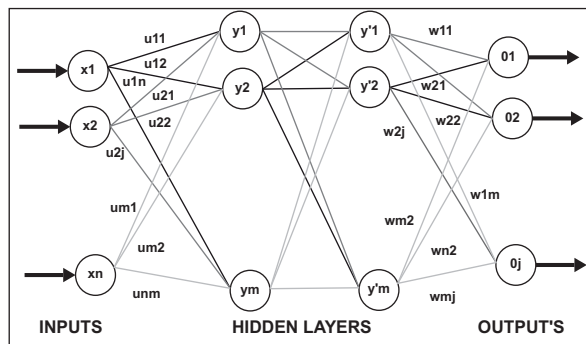


Figura A.9. Estructura de la red de propagación hacia atrás (Nilsson, 2001).

La aplicación de la red tiene dos fases, una hacia delante –*feedforward*– y otra hacia atrás –*backpropagation*. Durante la primera fase el patrón de entrada es presentado a la red y propagado hacia delante a través de las capas, hasta llegar a una capa de salida. Obtenidos los valores de salida de la red, se inicia la segunda fase, comparándose estos valores con la salida esperada para obtener el error. Se ajustan los pesos de la última capa proporcionalmente al error. Se pasa a la capa anterior con una retropropagación del error, ajustando convenientemente los pesos y continuando con este proceso hasta llegar a la primera capa. De esta manera se han modificado los pesos de las conexiones de la red para cada ejemplo o patrón de aprendizaje del problema del que conocíamos su valor de entrada y la salida deseada que debería generar la red ante dicho patrón.

A diferencia de la red perceptron multicapa, la técnica de propagación hacia atrás o generalización de la regla delta requiere el uso de neuronas cuya función de activación sea continua, y, por tanto, diferenciable. Esta característica es la que obviamente la distingue en general.

Describiendo la red de propagación hacia atrás, ésta se inicia con la presentación de un patrón de entrada, $X_p: x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pN}$ y especificación de la salida deseada que debe generar la red: d_p, d_2, \dots, d_M . Luego se calcula la salida actual de la red, para lo cual se presentan las entradas a la red y se calcula la salida que presenta cada capa hasta llegar a la capa de salida de la red y_1, y_2, \dots, y_M . Esto último implica aplicar los siguientes pasos:

- Se calculan las entradas netas para las neuronas ocultas procedentes de las neuronas de entrada. Para una neurona oculta j:

$$net_{pj}^h = \sum_{i=1}^N w_{ji}^h x_{pi} + \Theta_j^h$$

en donde h se refiere a magnitudes de la capa oculta; el subíndice p, al p-ésimo vector de entrenamiento, y j a la j-ésima neurona oculta. El término Θ puede ser opcional, pues actúa como una entrada más.

- Se calculan las salidas de las neuronas ocultas:

$$y_{pj} = f_j^h(net_{pj}^h)$$

- Se realizan los mismos cálculos para obtener las salidas de las neuronas de salida (*output*).

$$net_{pk}^0 = \sum_{j=1}^L w_{kj}^0 y_{pj} + \Theta_k^0$$

$$y_{pk} = f_k^0(net_{pk}^0)$$

Luego de cumplir estos pasos, se calculan los términos de error para todas las neuronas. Si la neurona k es una neurona de la capa de salida, el valor de delta es:

$$\delta_{pk}^0 = (d_{pk} - y_{pk}) f_k^{0'}(net_{pk}^0)$$

La función f, como se citó anteriormente, debe cumplir el requisito de ser derivable, lo que implica la imposibilidad de utilizar una función escalón. A continuación se muestra la salida sigmoideal:

$$f_k(net_{jk}) = \frac{1}{1 + e^{-net_{jk}}}$$

La derivada de la función f sigmooidal es:

$$f_k^{0'} = f_k^0(1 - f_k^0) = y_{pk}(1 - y_{pk})$$

por lo que, en términos de error, la neurona de salida es:

$$\delta_{pk}^0 = (d_{pk} - y_{pk})y_{pk}(1 - y_{pk})$$

Si la neurona j no es de salida, entonces la derivada parcial del error no puede ser evaluada directamente; por lo tanto, se obtiene el desarrollo a partir de valores que son conocidos y otros que pueden ser evaluados.

La expresión obtenida en este caso es:

$$\delta_{pj}^h = f_j^{h'}(net_{pj}^h) \sum_k \delta_{pk}^0 w_{kj}^0$$

donde observamos que el error en las capas ocultas depende de todos los términos de error de la capa de salida. De aquí surge el término propagación hacia atrás. En particular, la función sigmooidal:

$$\delta_{pj}^h = x_{pi}(1 - x_{pi}) \sum_k \delta_{pk}^0 w_{kj}^0$$

donde k se refiere a todas las neuronas de la capa superior a la de la neurona j. Así, el error que se produce en una neurona oculta es proporcional a la suma de los errores conocidos que se producen en las neuronas a las que está conectada la salida de ésta, multiplicado cada uno de ellos por el peso de la conexión. Los umbrales internos de la neurona se adaptan de forma similar, considerando que están conectados con los pesos desde entradas auxiliares de valor constante.

Migración, desigualdad, desarrollo humano y marginación. El caso de los migrantes mexiquenses hacia los Estados Unidos (1995-2000)

Migration, Inequity, Human Development And Marginalization, The Case Of Migrants From Mexico State Towards The United States Of America (1995-2000)

*Ángel Mauricio Reyes Terrón**

*Ricardo Rodríguez Marcial***

*Adán Barreto Villanueva****

Resumen

El presente documento aborda el tema de la migración que se origina en las diferentes regiones y municipios del Estado de México y que tiene como destino los Estados Unidos de Norteamérica, en el periodo 1995-2000. El estudio aplica el modelo gravitatorio de la migración y lo extiende incorporando variables como el Coeficiente de Desigualdad de Gini, el Índice de Desarrollo Humano y el Índice de Marginación, con el objetivo de verificar si contribuyen en la explicación de los flujos migratorios que se dirigen al país mencionado. La presencia de estas variables se justifica debido a que se refieren a la disparidad en la distribución

* Consejo de Investigación y Evaluación de la Política Social (CIEPS), Gobierno del Estado de México. Toluca, México. angel.reyesterron@yahoo.com.mx

** Facultad de Economía, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. riromar@yahoo.com.mx

*** Consejo de Investigación y Evaluación de la Política Social (CIEPS), Gobierno del Estado de México. Toluca, México. abv365@yahoo.com.mx

del ingreso y al suministro o disponibilidad de algunos bienes públicos. El análisis se efectúa a nivel de las 18 regiones y 122 municipios en que se divide política y administrativamente a la entidad mexiquense en el intervalo de referencia. El estudio aplica econometría de sección cruzada para establecer relaciones de correlación múltiple entre las variables involucradas. Como resultado se ofrecen algunas cuantificaciones que explican los flujos migratorios del segundo quinquenio de la década de los noventa y se distinguen algunas recomendaciones de política.

Abstract

The document addresses the issue of the migration originated in the different regions and municipalities of the state of Mexico and which destiny is the United States of America, during the period 1995-2000. The study applies the migration gravitational model and it extends incorporating a number of variables such as: Gini's inequality quotient the human development index and the marginalization index, both aimed to verify if such magnitudes contribute to the explanation of the influx heading to the above country. The presence of these variables is justified because they make reference to the disparity of the income distribution and the supply and availability of some public goods. The analysis takes into account the 18 regions and the 122 municipalities in which the State of Mexico is politically and administratively divided during the referred period. This study applies cross section econometrics to establish multiple correlation relations between the involved variables. As a result some quantification explaining the influx in the second half of the 90's are offered and some recommendations about politics are distinguished.

Palabras Clave: Migración, desigualdad, desarrollo humano, marginación.

Key words: Migration, inequity, human development, marginalization

Clasificación/Classification Jel: C21, D63, R23

1. Introducción

En el marco de la consolidación del proceso de apertura económica de México se producen mecanismos que incentivan la movilidad de los factores capital y trabajo. La mayor orientación exportadora y la entrada en vigor del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) favorecen la migración del capital procedente del exterior, robusteciendo la posición de la nación como economía emergente¹; al mismo tiempo, como fenómeno paralelo, se gesta una nueva oleada de migrantes mexicanos con destino a Estados Unidos (EU)². Dada su dinámica demográfica y social, y pese a su importancia económica y ventajas geográficas, al situarse en las cercanías de la capital del país, el Estado de México participa activamente en la movilidad de los trabajadores que se dirigen a Estados Unidos a lo largo de la década de los noventa (González, 2002).

El objetivo de este estudio es caracterizar algunos de los elementos que se encuentran detrás de la migración de mexiquenses que tienen como meta los Estados Unidos en el segundo quinquenio de la década inmediatamente precedente.

La primera parte del documento describe la migración y la asocia con algunas características relacionadas con el desarrollo social de las demarcaciones municipales. El énfasis se centra en variables como: el Coeficiente de Gini³, el Índice de Desarrollo Humano (IDH) del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)⁴ y el Índice de Marginación⁵, que calcula el Consejo Estatal de Población (COESPO).

1 Los 5 países emergentes que más contribuyen en el PIB mundial en 2007 son: Brasil, China, India, México y Sudáfrica, que en conjunto producen el 28 por ciento del producto (Pfaffenbach, 2007).

2 El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) define la emigración internacional como la acción mediante la cual una persona deja de residir en la República Mexicana para establecer su residencia habitual en otro país. Se considera el último movimiento migratorio realizado entre enero de 1995 y febrero de 2000. Igualmente establece que el emigrante a Estados Unidos es aquella persona que en los últimos cinco años anteriores a la entrevista salió de México para vivir en Estados Unidos, independientemente de que haya regresado a residir o no a México. Véanse también los estudios de López (2002) no hay en biblio) y González (2002).

3 El Coeficiente de Gini es una medida de la concentración del ingreso que toma valores entre cero y uno. Si el valor se acerca a uno, existe mayor concentración del ingreso, y viceversa (INEGI). Una revisión detallada de este indicador puede encontrarse, por ejemplo, en Cortés y Rubalcaba (1984), Medina (2001), Cortés (2002) y Tuirán (2005).

4 El Índice de Desarrollo Humano se refiere al proceso de ampliación de las opciones y capacidades de los individuos al asegurar una vida larga y saludable, acceso a la salud, la educación y a los recursos necesarios para alcanzar un nivel de vida digno. El índice es elaborado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (Ver, por ejemplo, el Diccionario de Acción Humanitaria y Cooperación al Desarrollo en: <http://dicc.hegoa.efaber.net/> y <http://es.wikipedia.org>).

5 El Índice de Marginación mide el déficit e intensidad de las privaciones y carencias de la población en dimensiones relativas a las necesidades básicas consagradas como derechos en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Se construye a partir del método de los componentes principales considerando aspectos como la educación, la vivienda, el ingreso y la distribución de la población en localidades de distinto tamaño. Ver. <http://www.conapo.gob.mx/>; Consejo Estatal de Población. Cortés (2002) revisa en profundidad el concepto de marginación.

Una segunda parte del estudio intenta avanzar en el esclarecimiento de los principales factores que determinan estas salidas de emigrantes hacia el país del norte, y si entre ellas se encuentran los indicadores de desarrollo mencionados. Con este propósito se efectúan experimentos econométricos que reproducen los elementos del modelo gravitatorio para explicar la migración en el sentido de flujos de trabajo (Greenwood, 1975, 1985; Shields y Shields, 1989), pero incorporando las variables referidas.

Cabe destacar que el acuerdo comercial que involucra a México con Estados Unidos y Canadá no contempla explícitamente la movilidad del trabajo poco cualificado (González, 1998, 2002, 2006; Márquez, 2007). A pesar de las restricciones, el trabajo como factor de producción ha estado crecientemente en movimiento en el sentido y dirección que predice la teoría, sin que ello signifique necesariamente un proceso de convergencia en los niveles de renta.

Debe recordarse que, bajo el modelo neoclásico de comercio internacional en el que existen dos sectores productivos, dos factores y dos regiones, la dinámica puede conducir a la prevalencia de *sistemas regionales económicamente en desequilibrio*. Esta situación se presenta ante condiciones extremas de polarización geográfica y se caracteriza por la concentración total de los migrantes y las actividades en uno de los países (o territorios) y el abandono del otro.

El fenómeno es inducido por el predominio de asimetrías salariales. La migración se dirige a la circunscripción en la que se localiza el sector económico que observa mayor crecimiento; simultáneamente, las diferencias en cuanto a costo de vida retroalimentan las corrientes migratorias hacia un sólo lado a costa del deterioro de la región expulsora, en la que se ha establecido el sector económico con bajo o nulo crecimiento.

Otra posibilidad conduce a *sistemas regionales con diferencias compensadoras*, y se basa en el mismo modelo $2 \times 2 \times 2$, pero se introducen modificaciones en los supuestos sobre la migración, de manera que puedan obtenerse resultados menos sorprendentes y quizás más cercanos a la realidad. La idea es permitir que los flujos de migrantes entre una región y otra se compensen entre sí en un proceso que llevaría hacia el equilibrio geográfico-espacial y, eventualmente, hacia la convergencia (Lewis, 1954; Greenwood, 1985; Baldwin *et al.*, 2003).

En este contexto, el Estado de México es tanto receptor de importantes flujos de inversión extranjera directa (IED) como origen de corrientes migratorias de trabajadores hacia los

Estados Unidos de Norteamérica. Algunos datos relevantes subrayan la importancia que adquieren estos flujos⁶.

Entre 1990 y 2000, el número de mexiquenses en Estados Unidos pasa de 206,566 a 485,442 personas, según la Encuesta sobre Migración en la Frontera Norte de México (EMIF). En sólo diez años esta población creció un 135 por ciento, es decir, 8.1 por ciento en promedio anual a lo largo del periodo. Santibáñez (2004) estima que el número de mexiquenses residentes en EU en el año 2000 se encuentra entre 340 y 522 mil⁷.

En el periodo 1998-2002, el 80 por ciento de los emigrantes permanentes del Estado de México con destino a Estados Unidos son hombres y menos del 20 por ciento son mujeres; más del 50 por ciento de ellos se encuentran en edades entre los 20 y los 29 años. La causa principal de la decisión de emigrar al país del Norte que se reporta para la entidad mexiquense es la laboral: cerca del 100 por ciento de los migrantes se mueven en busca de empleo; poco más del 85 por ciento son indocumentados y más del 70 por ciento envían remesas⁸ a sus familias (Santibáñez, 2004).

Según el XII Censo General de Población y Vivienda del 2000, publicado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el Estado de México tiene 127,425 emigrantes internacionales entre 1995 y 2000. El CONAPO considera que, durante ese lapso, 78,368 hogares mexiquenses tienen integrantes migrantes a los Estados Unidos, lo que representa un 2.6 por ciento del total de los hogares existentes en la entidad. Un 2.1 por ciento del total de las unidades familiares del Estado recibe ingresos por concepto de remesas. Unos 16,714 hogares cuentan con migrantes circulares y 9,797 con migrantes de retorno.

Entre 1995-2000, en el Estado de México, las regiones X, Tejupilco; VI, Ixtapan de la Sal y XV, Valle de Bravo, ostentan los más altos porcentajes de hogares con integrantes migrantes a Estados Unidos, con 14.46, 11.49 y 5.45 por ciento, respectivamente.

A nivel de municipios, Coatepec Harinas presenta un índice de intensidad migratoria muy alto; Almoloya de Alquisiras, Amatepec, Tejupilco, Tlatlaya y Tonicato reportan índices altos, y

6 Carrasco (1999) señala algunas causas económicas de la migración internacional, tales como: la búsqueda de un mayor bienestar en otro lugar; la formación de expectativas a partir de diferencias de ingreso, niveles de desempleo, diferencias de precios, tasas relativas de crecimiento económico, etc. Otro elemento corresponde a la demanda de trabajo en el país de destino. González (2002) considera que las variaciones en la intensidad del flujo migratorio de mexiquenses a Estados Unidos obedece a fenómenos económicos, demográficos y sociales.

7 Véase también el trabajo de González (2002).

8 El concepto de remesas es analizado, por ejemplo, en González (2006).

circunscripciones como Almoloya del Río, Ixtapan de la Sal, Malinalco, Ocuilan, Oztoloapan, San Simón de Guerrero, Soyaniquilpan de Juárez, Temascaltepec, Texcaltitlán, Villa Guerrero, Zacazonapan, Zacualpan y Zumpahuacán registran índices migratorios medios⁹.

En lo que se refiere a remesas familiares, según la EMIF, el Estado de México absorbe 161 millones de dólares en 1995 por este concepto. Ocho años más tarde, en 2003, este monto supera los mil millones de dólares. El total de estos envíos aumenta en 6.5 veces entre un año y otro.

Información del Banco de México revela que, en el primer trimestre de 2003, el Estado de México es el cuarto lugar nacional en cuanto a participación en las remesas familiares, al concentrar el 7.45 por ciento de estos ingresos. Ese año, la entidad recibe 1,017.2 millones de dólares bajo el mismo rubro.

Para el trimestre julio-septiembre de 2008, el Estado de México aglutina el 9.03 por ciento del total nacional de los ingresos por remesas (es la tercera entidad más relevante en este flujo de dinero procedente del exterior). En lo que va del año, la entidad ha captado 1,462.9 millones de dólares en recursos que los migrantes envían a sus familias.

Entre 2003 y 2007, la entidad mexiquense ha recibido un total de 8,101 millones de dólares en remesas. Estos ingresos se han duplicado al pasar de 1,017.2 millones de dólares en 2003 a 2,022.4 millones en 2007; se trata de un crecimiento de 14.7 por ciento en promedio anual.

Para las unidades familiares, las remesas representan la oportunidad de aumentar el consumo doméstico (González, 2002, 2006), invertir en la educación de los hijos (capital humano) y asignar estos ingresos complementarios a la satisfacción de las necesidades de los hogares y sus integrantes¹⁰.

Por otro lado, en 2003, al comparar los ingresos por remesas (US\$ 1,017.2 millones de dólares) con el monto de la inversión extranjera directa (US\$ 663.5 millones de dólares)

⁹ Cabe aclarar que el grado de intensidad migratoria es un índice que elabora el Consejo Nacional de Población con el fin de aumentar el conocimiento sobre el fenómeno migratorio hacia los Estados Unidos. El indicador cubre a los Estados y municipios de México, y se construye a partir de información de la muestra del 10 por ciento del XII Censo General de Población y Vivienda, de 2000, y resume en una medida los porcentajes de hogares con migrantes, migrantes circulares y de retorno a Estados Unidos en el quinquenio anterior; igualmente, utiliza el porcentaje de hogares receptores de remesas y emplea, además, los hogares como unidad básica de análisis.

¹⁰ En particular, González (2002) refiere que todos los municipios del Estado de México aportan migrantes a Estados Unidos, en virtud de que la totalidad recibe remesas provenientes del exterior.

en el Estado de México, se observa que las primeras son 1.5 veces superiores a la segunda; son además 8.1 veces más grandes que la suma del gasto público asignado a las tres regiones más expulsoras de emigrantes hacia Estados Unidos (que corresponden a la VI Ixtapan de la Sal, X Tejupilco y XV Valle de Bravo). Finalmente, el total de remesas alcanzado en 2003 es equivalente al 69 por ciento del gasto público total ejercido en el Estado de México en ese mismo año. Esto según información del Anuario Estadístico del Estado de México publicado por el INEGI.

Estas cifras advierten la importancia que han adquirido las corrientes migratorias que parten del Estado de México y que culminan en Estados Unidos; de igual manera, sobresale el volumen de los flujos por remesas desde el país más grande, con el sector económico en crecimiento, hacia México, una economía en desarrollo.

En el presente documento se afirma que variables de desarrollo como el Coeficiente de Gini, el Índice de Desarrollo Humano y el Índice de Marginación contribuyen en la explicación de los flujos migratorios de mexiquenses que se dirigen a los Estados Unidos. La movilidad responde a asimetrías que actúan como incentivos económicos, destacando las diferencias en cuanto a ingreso *per cápita* anual en dólares entre los municipios del Estado de México y el existente en el país del Norte; la distancia interviene como barrera a la migración, y la variable que simula al *stock* de emigrantes en el país de destino alimenta la corriente de emigrantes. Adicionalmente aparece una bolsa de trabajadores que se encuentran en continuo movimiento, atrapados en los mecanismos de la migración circular por razones laborales¹¹.

El trabajo se articula a través de las siguientes secciones: el segundo apartado se centra en la discusión teórica sobre migración internacional, recuperando los estudios empíricos relativos a los determinantes de los flujos migratorios en México y en la entidad mexiquense. La tercera sección proporciona información descriptiva sobre los flujos de trabajo que se originan en el Estado de México y que tienen destino en la nación norteamericana. El cuarto apartado avanza en la especificación de un modelo econométrico de corte transversal que intenta cuantificar el efecto que ejercen los principales determinantes de las corrientes migratorias especificadas, el sentido y la magnitud de su influencia. El documento finaliza con una sección de conclusiones.

¹¹ Véase el trabajo de Reyes y Mur (2008) sobre las migraciones interiores en España.

2. Antecedentes

2.1. Marco teórico

Uno de los primeros estudios de revisión de la literatura empírica desarrollada en EU es el realizado en Greenwood (1975). Su preocupación se centra en establecer un ordenamiento de los trabajos existentes bajo criterios teóricos. La investigación de Greenwood es un referente obligado en la literatura posterior a su publicación al distinguir lo que se había hecho hasta entonces y al sugerir sendas de trabajo insuficientemente exploradas por las que debía continuar la discusión¹².

En su análisis sobre los determinantes de las migraciones, Greenwood identifica dos subdivisiones: una sobre la migración como una magnitud general (*gross migration o GM_{ij}*), que consiste en un solo flujo de emigrantes o en la suma de flujos unidireccionales desde el origen *i* hacia el destino *j*, por ejemplo, la emigración total desde *i* (*GOM_i*)

$$GOM_i = \sum_{j=1}^n GM_{ij} \quad (1)$$

y otra relativa a estudios sobre migración neta (*NM_{ij}*), que toma en cuenta los flujos origen-destino y viceversa, es decir, en los dos sentidos entre cada par de localizaciones:

$$NM_{ij} = GM_{ij} - GM_{ji} \quad (2)$$

$$NM_{ij} = \sum_{j=1}^n GM_{ij} - \sum_{j=1}^n GM_{ji}$$

En el caso de los estudios donde la variable dependiente es la migración como flujo unidireccional, el autor observa que la mayoría de los trabajos empíricos analizan la migración entre una región y otra en el marco de la maximización de la utilidad individual. Los modelos son generalmente gravitatorios¹³, soportando la hipótesis de que los movimientos están

¹² Carrasco (1999) hace una excelente revisión crítica de las diferentes teorías que explican la migración internacional.

¹³ El modelo gravitatorio permite analizar y prever la geografía de los flujos y la distribución de las interacciones sobre un conjunto de lugares, es decir, la fuerza de atracción de cada lugar y de la dificultad de las comunicaciones entre ellos. El modelo se formula en analogía con la ley de la gravitación universal de Newton, según la cual la atracción gravitatoria entre dos cuerpos es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de sus distancias. Al aplicar la misma idea en un espacio de circulación relativamente homogéneo, cuanto mayores sean los intercambios entre dos regiones o dos ciudades, mayor será el peso de esas ciudades o regiones; los intercambios serán más débiles si éstas están alejadas. El modelo resume adecuadamente la esencia de los movimientos que se producen en un medio donde la movilidad y la accesibilidad son relativamente homogéneas; no obstante, se trata de un modelo estático con limitaciones desde el punto de vista teórico (Véase: http://www.hypergeo.eu/article.php3?id_article=168 ; Greenwood, 1975).

directamente relacionados con el tamaño de las poblaciones entre el origen y el destino, e inversamente relacionados con la distancia. Las variables independientes más relevantes en la literatura incluyen la distancia, las disparidades interregionales en el ingreso, el coste de la migración, la información y las características individuales de los emigrantes potenciales.

La distancia física actúa como una barrera a la migración en los modelos gravitacionales. La migración disminuye con la distancia, tal vez debido a que constituye un aproximado de los costos de transporte, de los costos del movimiento y del acceso a la información en el área geográfica de destino. A pesar de esto, con frecuencia se encuentra que los beneficios de la migración no son suficientemente grandes y los costes de transporte no siempre desincentivan la decisión de emigrar. Por su parte, los costos pueden ser sustanciales y encontrarse directamente relacionados con la distancia. Adicionalmente, la información disponible para el individuo disminuye considerablemente con la distancia, al tiempo que la incertidumbre se incrementa (Greenwood, 1975, 1985).

Otra variable a la que responden las migraciones son las diferencias regionales en los niveles de ingreso. El emigrante potencial elige el destino en el que maximiza los beneficios netos esperados, traídos a valor presente como para justificar su decisión individual de moverse. En este proceso puede distinguirse el comportamiento electivo del individuo, que discrimina entre los distintos destinos alternativos. La medida de ingreso relevante corresponde al valor presente neto de los rendimientos esperados, tal como en Sjaastad (1962).

En general, la influencia del ingreso sobre la migración puede considerarse de dos maneras: una como la medida del ingreso agregado en los estudios de migración, y la otra como el ingreso específico del emigrante. La primera perspectiva señala la dirección del movimiento desde las regiones de ingreso bajo hacia las de ingreso o salario elevado; en ese contexto, la preocupación principal se concentra en establecer la magnitud de la relación. La segunda perspectiva trata de determinar qué tanto se beneficia el emigrante con el movimiento.

Greenwood (1975) nota que un resultado común en diversos estudios de migración es que el ingreso y las mejores oportunidades de trabajo alientan los flujos migratorios de unas regiones a otras. Localidades con condiciones económicas favorables atraen a los inmigrantes; por el contrario, las regiones deprimidas ven salir flujos de emigrantes. Generalmente este marco brinda una explicación satisfactoria para las migraciones de las áreas rurales a las urbanas, del Sur al Norte, etc.

Todaro (1969) encuentra que existe una relación positiva entre diferenciales de ingreso y migración pero las diferencias de ingresos esperados también pueden ser negativas al haber una elevada probabilidad de que los trabajadores emigrantes de las áreas rurales no cuenten con las habilidades necesarias que se demandan en las demarcaciones urbanas o en las regiones de destino.

Greenwood destaca también que las tasas de desempleo funcionan como un factor expulsor que induce a los individuos a moverse especialmente si se trata de jóvenes, que poseen educación formal y que viven en poblaciones pequeñas. También existe evidencia de que los desempleados y los individuos que antes habían emigrado muestran cierta inclinación a emigrar nuevamente. Otros estudios argumentan que las características de las regiones de destino son relevantes en la decisión de emigrar. Algunos estudios aplicados al caso de los EU dan cuenta de procesos de retroalimentación de los flujos migratorios así como de *migración inversa*, caracterizada porque regiones con altos niveles de renta per cápita, bajas tasas de desempleo y altas tasas de crecimiento del empleo presentan flujos de emigrantes mayores a los de inmigrantes¹⁴.

Respecto al argumento que sostiene que la migración disminuye cuanto mayor es la distancia y, que a su vez, la distancia es una medida aproximada de los costos del movimiento, Greenwood simplemente recupera los planteamientos de Sjaastad (1962) quien dice que dichos costos son semejantes al excedente del consumidor para el emigrante potencial. Es decir, existe cierto nivel mínimo de ganancias en la localización i que determinan que el individuo sea indiferente entre migrar y permanecer en i ; cualquier nivel de beneficios por encima de ese nivel de reserva implica un excedente que puede ser valorado sin que ello implique necesariamente un desplazamiento o un efecto directo sobre la asignación de recursos del individuo. Así, los costes no constituyen un desembolso de dinero pero afectan la asignación de recursos al influir sobre los costos privados de la migración.

Greenwood menciona el estudio de Schwartz (1973), que propone hacer tangibles los costos psicológicos de la migración cuantificándolos como unidades monetarias; por ejemplo, al considerarlos en términos de costos de transporte para la realización de visitas a parientes y amigos en el lugar de origen, obviamente los costes de transporte aumentan con

14 Greenwood (1985) habla de la migración inversa observada en los Estados Unidos, menciona que es causada por factores como (1) los cambiantes costos relativos de efectuar negocios en los centros urbanos tradicionales; (2) crecimiento de industrias basadas en recursos naturales localizadas en áreas no metropolitanas; (3) aumento del ingreso, la riqueza y de la demanda de amenidades específicas de localización; (4) cambios en la estructura demográfica de la población y de la fuerza de trabajo; (5) políticas gubernamentales.

la distancia. Más tarde, Schwartz (1976) señala que los costos psicológicos parecen poco relevantes cuanto mayor sea la educación formal de los individuos.

Otro elemento en la discusión sobre migraciones tiene que ver con las posibilidades de acceso a la información por parte de los sujetos de un movimiento migratorio. Por ejemplo, Greenwood señala que existe mayor probabilidad de moverse cuando el individuo tiene al menos alguna información sobre el lugar de destino. Una razón que explica la menor migración en respuesta a la distancia física es precisamente la información. En la medida en que aumenta la distancia, se dispone de menor información sobre la región de destino y, al mismo tiempo, la incertidumbre aumenta. Sin embargo, existe evidencia que soporta la idea de que la presencia de un *stock* de emigrantes, es decir, el número de personas originarias de la región *i* pero que viven en la región *j* en el momento en que la migración se produce, disminuye el efecto de la incertidumbre; dicho de otra forma, la migración pasada es un factor determinante de las migraciones en el periodo presente.

Greenwood habla de las características personales como elemento en la decisión de emigrar. Por ejemplo, diversos estudios para el caso de los Estados Unidos advierten que la migración disminuye con la edad. Esta relación se explica porque los adultos mayores poseen un horizonte de vida productiva menor en comparación con las generaciones jóvenes: mayor edad, menores rendimientos esperados de la migración. Además, la seguridad en el empleo y los lazos familiares son aspectos a tomar en cuenta por parte de los segmentos de población con mayor edad, por lo que, en consecuencia, muestran una baja inclinación a emigrar en relación a los jóvenes.

La información sobre empleo y el acceso a mejores oportunidades aumenta con la educación y el nivel de cualificación de los individuos. Además, la educación reduce la importancia de la tradición y los lazos familiares, lo que incrementa la disposición a emigrar. Para los individuos mejor cualificados, la distancia se desvanece como una barrera para la migración.

En un estudio posterior, Shields y Shields (1989) revisan la literatura internacional sobre migraciones. Uno de los enfoques teóricos que proponen se refiere al emigrante como un suministrador de trabajo, aludiendo al modelo clásico de flujos migratorios por motivos económicos en el que los trabajadores responden a desequilibrios de mercado. Bajo esta perspectiva, las diferencias espaciales en materia de dotación de factores productivos determinan el movimiento del trabajo y del capital, que se desplazan asumiendo racionalidad

y conducta tendiente hacia la optimización. El trabajo se mueve de la región i a la j , en respuesta a la diferencia de salarios entre una y otra. El mecanismo puede ser entorpecido por barreras a la migración, como la distancia, la información imperfecta y otros impedimentos artificiales capaces de restringir la velocidad del proceso. Eventualmente, el mecanismo de ajuste compensa las diferencias existentes, conduciendo a una situación de equilibrio y de homogeneidad entre las regiones.

De acuerdo a Shields y Shields (1989), el tipo habitual de especificación es:

$$M_{ij} = f(w_i, w_j, u_i, u_j, D_{ij}) \quad (3)$$

donde:

M_{ij} : Migración bruta de trabajadores desde i a la región j

w_i, w_j : Tasas de salarios reales en las regiones i y j

D_{ij} : Distancia entre las regiones i y j

u_i, u_j : Tasas de desempleo en las regiones i y j

Shields y Shields señalan que los estudios empíricos bajo esta perspectiva hacen depender la dirección del flujo migratorio de las diferencias salariales entre regiones. Los trabajadores se mueven desde zonas rurales hacia las urbanas, del Sur al Norte. Una anomalía frecuente en esta línea es la persistencia de las diferencias salariales entre las regiones, la cual se explica añadiendo diversas variables independientes, como los costes de movilidad, la estructura del empleo, las tasas de desempleo regional, las *amenidades*¹⁵, etc.

Las extensiones del modelo básico de flujos de trabajo reconocen la existencia de factores locales específicos y el relajamiento del supuesto de homogeneidad en el empleo. Ambos pueden resultar en diferencias en cuanto a la composición del empleo, de las actividades económicas y de las tasas salariales regionales. De esta forma, los salarios se asocian a diferencias en las características individuales de la fuerza de trabajo de las diferentes regiones, tales como habilidades, edad, raza, sexo y educación. Interpretado en este sentido, cabe la posibilidad de que las discrepancias entre regiones puedan perpetuarse. Otras consideraciones se refieren a

¹⁵ El término *amenidades* (del inglés *amenities*) puede entenderse en el sentido de comodidades, servicios e instalaciones, por ejemplo, de una ciudad o demarcación geográfica. En la literatura sobre migraciones es frecuente encontrar el término *amenidades* para significar un conjunto de factores como el clima o la disponibilidad de servicios sociales y oportunidades recreativas que pueden considerarse bienes no comerciables y que hacen atractiva una ciudad, provincia o región, en relación a otras (Véase, por ejemplo, Greenwood, 1975; Shields y Shields, 1989; de la Fuente, 1999).

los costos monetarios y psicológicos de la migración, la presencia de barreras artificiales sobre la oferta y demanda de trabajo, etc.

2.2. Panorama general de la literatura empírica sobre migración de los mexicanos hacia los Estados Unidos

En este estudio se comentan algunos de los trabajos empíricos más relevantes publicados en relación al tema de las corrientes migratorias de mexicanos con destino a Estados Unidos. Aunque se revisan los estudios existentes, el énfasis se centra en aquéllos que se refieren a los determinantes de los flujos de trabajo hacia aquel país y sus consecuencias.

Algunos estudios empíricos recientes analizan los flujos migratorios de nacionales que se dirigen a los Estados Unidos por causas laborales. Entre ellos se encuentran, por ejemplo, los trabajos de Domínguez y Zuleta (2006) y Mendoza (2006), quienes aplican técnicas econométricas para dilucidar el efecto de las remesas en el desarrollo de las localidades en que se origina la migración, y para establecer las variables que determinan las corrientes de migrantes al vecino país de Norte, respectivamente.

Domínguez y Zuleta (2006) identifican el efecto de las remesas enviadas por los migrantes a sus comunidades de origen en México, observan el efecto de la participación de la mujer en el proceso, utilizan datos del Consejo Nacional de Población para el año 2000, recuperan variables como el Índice de Desarrollo Humano, la Intensidad Migratoria y las remesas para los 2,443 municipios de México. La evidencia empírica sugiere que las remesas tienen un impacto positivo sobre los niveles de desarrollo de las comunidades receptoras. No obstante, la relación entre remesas y desarrollo es no lineal. Adicionalmente, encuentran que el efecto positivo que ejercen las remesas sobre el desarrollo es más alto cuando la cabeza de familia de los hogares receptores es mujer.

Por su parte, Mendoza (2006) se centra en el estudio de los determinantes macroeconómicos regionales de la migración mexicana a Estados Unidos. Con base en información sobre las características económicas y sociales de las entidades federativas, utiliza un modelo de mínimos cuadrados generalizados aplicado a una base de datos regionales de corte transversal.

Entre los hallazgos más relevantes, Mendoza observa un coeficiente positivo entre la proporción del producto interno bruto (PIB) de Estados Unidos respecto al de los estados

mexicanos y el crecimiento de la migración. De hecho, el PIB estatal, expresado en términos *per cápita*, arroja un coeficiente positivo, sugiriendo que los Estados con menores ingresos experimentan mayores incentivos para la migración. Otras variables, como las tasas de desempleo y los acervos de migración permanente en Estados Unidos, muestran un efecto positivo, subrayando la importancia de las redes sociales en los costos de la migración. Las variables de apertura económica no son concluyentes, aunque la IED exhibe un signo positivo con respecto al crecimiento de la migración.

En un estudio reciente sobre el Estado de México, González (2006) examina la migración y el uso de las remesas en los municipios de Tejupilco y Almoloya de Alquisiras. El autor se concentra en los principales rubros de gasto familiar en los que se destinan los ingresos por remesas que envían los migrantes en Estados Unidos a favor de sus dependientes económicos. Los resultados indican que una proporción importante de estos recursos se destina al consumo de las familias, y una porción relativamente pequeña se reserva para gasto en inversión con fines productivos.

González propone algunas recomendaciones de política que deben ser implementadas por parte del Gobierno del Estado de México para favorecer el desarrollo local en las comunidades analizadas y brindar apoyo a los migrantes en Estados Unidos y sus familias.

En otro estudio de caso, Loza *et al.* (2007) exploran algunos elementos de carácter cualitativo sobre la migración de mexiquenses a Estados Unidos bajo una perspectiva de género. Analizan el papel de las jefas de familia ante la migración transnacional masculina en las comunidades de Las Vueltas (Coatepec Harinas), La Unión Riva Palacio (Almoloya de Alquisiras) y Potzontepec (Sultepec). El trabajo pone de manifiesto que la jefatura de hogar y la autonomía asumida por las mujeres se relacionan más con la ausencia física del varón y con el origen del dinero que con el control de las remesas recibidas.

La literatura que analiza el caso del Estado de México aborda el tema bajo una perspectiva sociodemográfica y de desarrollo, como en los artículos de González (1998, 2006) y Loza *et al.* (2007); sin embargo, no parecen existir estudios empíricos sobre los determinantes de la migración de mexiquenses hacia Estados Unidos; en este sentido, el presente documento resulta novedoso al cubrir una parte del fenómeno que no ha sido suficientemente analizada hasta ahora.

3. Flujos de trabajo mexiquenses hacia Estados Unidos

3.1. Migración y desarrollo en las regiones y municipios del Estado de México

En esta sección se presentan algunos resultados descriptivos que dan idea de la relación que existe entre las corrientes migratorias de mexiquenses hacia Estados Unidos y las variables de desarrollo señaladas.

En el Cuadro 1 se observa que las regiones del Estado de México que reportan los mayores porcentajes promedio de hogares con migrantes en Estados Unidos durante el periodo 1995-2000, son, en orden de importancia, X, Tejupilco; VI, Ixtapan de la Sal; XV, Valle de Bravo; IX, Nezahualcóyotl; II, Atlacomulco; III, Chimalhuacán; V, Ecatepec y XII, Tlalnepantla.

Las regiones con menor proporción de hogares con individuos migrantes hacia Estados Unidos y, por tanto, menos expulsoras de fuerza de trabajo son: VII, Lerma; XI, Texcoco; XIII, Toluca; IV, Cuautitlán Izcalli; XIII Bis, Metepec; VIII; Naucalpan; XVI, Zumpango; V Bis, Otumba; XIV, Tultitlán y I, Amecameca.

Cuadro 1
Estado de México, migración, desigualdad, desarrollo humano y marginación por región (promedios)

| Región | % Promedio de hogares con migrantes a Estados Unidos en el quinquenio anterior | Coefficiente de Gini | Índice de Desarrollo Humano | Índice de marginación | Grado de marginación |
|-----------------------|--|----------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------|
| I Amecameca | 1.95 | 0.5129 | 0.7719 | -0.3249 | Media |
| II Atlacomulco | 3.16 | 0.6026 | 0.7271 | 0.9184 | Muy alta |
| III Chimalhuacán | 2.84 | 0.4883 | 0.7867 | -0.7781 | Baja |
| IV Cuautitlán Izcalli | 1.40 | 0.4953 | 0.7911 | -0.5795 | Baja |
| V Ecatepec | 2.57 | 0.4683 | 0.8061 | -1.0551 | Baja |
| V Bis Otumba | 1.69 | 0.5135 | 0.7663 | -0.3215 | Media |
| VI Ixtapan de la Sal | 11.49 | 0.6460 | 0.7088 | 0.9198 | Muy alta |
| VII Lerma | 1.02 | 0.5463 | 0.7589 | -0.1814 | Media |
| VIII Naucalpan | 1.58 | 0.5249 | 0.7961 | -0.6206 | Baja |
| IX Nezahualcóyotl | 3.35 | 0.5121 | 0.8149 | -1.2441 | Baja |
| X Tejupilco | 14.46 | 0.7000 | 0.6990 | 1.4058 | Muy alta |
| XI Texcoco | 1.05 | 0.4943 | 0.7764 | -0.6861 | Baja |
| XII Tlalnepantla | 2.12 | 0.5485 | 0.8396 | -1.2999 | Muy baja |
| XIII Toluca | 1.07 | 0.6486 | 0.7693 | -0.0632 | Media |
| XIII Bis Metepec | 1.57 | 0.5353 | 0.7889 | -0.6543 | Baja |
| XIV Tultitlán | 1.93 | 0.4563 | 0.8156 | -1.2006 | Baja |
| XV Valle de Bravo | 5.45 | 0.6545 | 0.6928 | 1.3523 | Muy alta |
| XVI Zumpango | 1.61 | 0.5128 | 0.7782 | -0.6241 | Baja |

Fuente: Coordinación de Estudios y Proyectos Especiales de la Secretaría de Desarrollo Social del Estado de México a partir de datos del XII Censo General de Población y Vivienda, 2000; del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo; de los Consejos Nacional y Estatal de Población, 2000.

La región X, Tejupilco, se caracteriza por tener el más alto porcentaje de unidades familiares con migrantes en Estados Unidos, el mayor coeficiente de desigualdad en la distribución del ingreso (Gini), el segundo IDH más bajo en relación al resto de las regiones y, por si fuera poco, los peores Índice y Grado de Marginación. En condiciones similares se encuentran las regiones VI, Ixtapan de la Sal y XV, Valle de Bravo.

En la región X, Tejupilco, en el año 2000, el 24.7 por ciento de la población mayor de 15 años era analfabeta; el 49 por ciento no había terminado la primaria; el 54 por ciento habitaba en viviendas con algún nivel de hacinamiento y el 60.3 por ciento de la población percibía ingresos de hasta 2 salarios mínimos. Esto de acuerdo con cifras del XII Censo de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

En el mismo año, la Región VI, Ixtapan de la Sal reporta que el 15 por ciento de población es analfabeta; el 42.8 por ciento de los mayores de 15 años de edad manifiesta tener primaria incompleta; el 58.9 por ciento del total de su población vive con algún grado de hacinamiento y el 68.2 por ciento de los ocupados gana menos de 2 salarios mínimos.

Cuadro 2
Estado de México, porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior y Coeficiente de Gini

| | | Porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior | | | |
|----------------|---------------|---|---|---|--|
| | | 0 - 4.9% | 5 - 9.9% | 10 - 14.9% | 15 - 20% |
| Índice de Gini | De 0.4 a 0.49 | Zumpango, Acolman, Tultitlán, Tultepec, Tlalmanalco, Almoloya del Río, Tezoyuca, Tequixquiac, Tepotzotlán, Apaxco, Atenco, Tepetlaoxtoc, Teotihuacán, Teoloyucán, Tenango del Aire, Temascalapa, Temamatla, Tecámac, San Mateo Atenco, Coacalco de Berriozábal, San Antonio la Isla, Cocotitlán, Coyotepec, Polotitlán, Chalco, Ozumba, Chapultepec, Otzolotepec, Chicoloapan, Chiconcuac, Chimalhuacán, Otumba, Ecatepec de Morelos, Ocoyoacac, Huehuetoca, Nopaltepec, Nicolás Romero, Isidro Fabela, Ixtapaluca, Melchor Ocampo, Juchitepec, Jocotitlán, Jilotzingo, Jaltenco | Tenancingo | | |
| | De 0.5 a 0.87 | Valle de Chalco Solidaridad, Cuautitlán Izcalli, Aculco, Zinacantepec, Almoloya de Juárez, Xonacatlán, Amanalco, Villa Victoria, Amecameca, Villa del Carbón, Villa de Allende, Atizapán, Atizapán de Zaragoza, Atlacomulco, Atlautla, Axapusco, Ayapango, Calimaya, Capulhuac, Valle de Bravo, Toluca, Tlalnepantla de Baz, Tianguistenco, Cuautitlán, Texcoco, Chapa de Mota, Texcalyacac, Chiautla, Tepetlixpa, Tenango del Valle, Temoaya, Donato Guerra, San Martín de las Pirámides, Ecatingo, San Felipe del Progreso, Hueypoxtla, Huixquilucan, Rayón, La Paz, Papalotla, El Oro, Ixtlahuaca, Xalatlaco, Nextlalpan, Jilotepec, Nezahualcóyotl, Jiquipilco, Naucalpan de Juárez, Morelos, Mexicaltzingo, Lerma, Metepec | Acambay, Zacazonapan, Villa Guerrero, Tonatico, Timilpan, Temascaltepec, Temascalcingo, Sultepec, Soyaniquilpan de Juárez, Santo Tomás, San Simón de Guerrero, Joquicingo | Texcaltitlán, Tejupilco, Otzoloapan, Almoloya de Alquisiras, Ocuilan, Malinalco, Ixtapan del Oro, Ixtapan de la Sal | Zumpahuacán, Zacualpan, Tlatlaya, Coatepec Harinas, Amatepec |

Fuente: Coordinación de Estudios y Proyectos Especiales de la Secretaría de Desarrollo Social del Estado de México a partir de datos del Consejo Nacional de Población.

La situación en la región XV, Valle de Bravo no es muy diferente: un 21.5 por ciento de la población que supera los 15 años de edad es analfabeta; un 51.8 por ciento no terminó la primaria; el 63.9 por ciento del total de sus habitantes muestra alguna forma de hacinamiento en su vivienda, y el 63.5 por ciento de los económicamente activos ocupados obtiene ingresos de hasta dos salarios mínimos.

En el otro extremo aparecen las regiones VII, Lerma; XI, Texcoco; XIII, Toluca; IV, Cuautitlán Izcalli; XIII Bis, Metepec y VIII, Naucalpan; las cuales muestran bajos porcentajes de hogares con migrantes internacionales, coeficientes de Gini moderados, mejores IDHs y niveles de marginación reducidos (bajos) e intermedios.

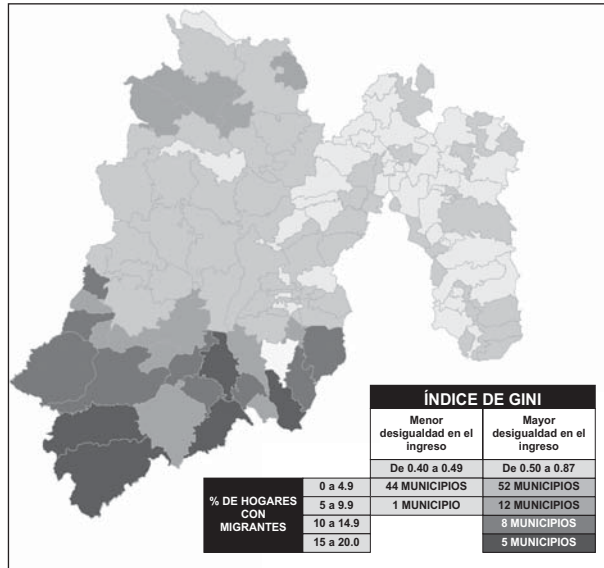
Por ejemplo, la región VIII, Naucalpan concentra el 18 por ciento del producto interno bruto del Estado de México en el año 2000. Conjuntamente, este grupo de regiones condensa el 46.9 por ciento de la producción bruta total de la entidad, según datos proporcionados por el Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Gobierno del Estado de México (IGECEM).

Estos resultados pormenorizados sugieren que las regiones con mayor proporción de hogares con migrantes hacia Estados Unidos observan elevados índices de desigualdad en la distribución del ingreso, reportan índices de desarrollo humano menores, en comparación con el resto de las circunscripciones, y ostentan índices de marginación alta o muy alta.

3.2. Migración y desigualdad en la distribución del ingreso

El Cuadro 2 relaciona la razón de hogares con migrantes en Estados Unidos y el coeficiente de Gini. Las variables se desagregan en 4 y 2 intervalos, respectivamente. Un total de 96 municipios caen en el segmento de menor proporción de hogares con migrantes en cualquiera de las dos divisiones del Coeficiente de Gini (de baja y alta desigualdad distributiva en el ingreso).

Mapa 1
Estado de México, porcentaje de migrantes en Estados Unidos en el lustro anterior y coeficiente de Gini



El municipio de Tenancingo se ubica en el segundo intervalo de hogares con unidades migrantes, con porcentaje entre 5 y 9.9, y coeficiente de Gini moderadamente desigual. Otros 25 municipios se reparten en los segmentos de hogares con integrantes migrantes entre 5 a 9.9; 10 a 14.9 y 15 a 20 por ciento. Estas circunscripciones presentan mayor intensidad migratoria y elevada inequidad en la distribución del ingreso. El grupo en peor situación incluye a los municipios de Zumpahuacán, Zacualpan, Tlatlaya, Coatepec Harinas y Amatepec.

El mapa 1 ilustra la relación entre las dos variables consideradas, pero desde un punto de vista geográfico.

3.3. Migración y desarrollo humano

El Cuadro 3 asocia el porcentaje de hogares con integrantes migrantes en Estados Unidos y el índice de desarrollo humano a nivel municipal para el Estado de México. Las circunscripciones municipales se diseminan en los intervalos de las dos variables. Esta manera de ordenar la información permite aislar convenientemente a las demarcaciones que expulsan población y el vínculo con su desarrollo humano.

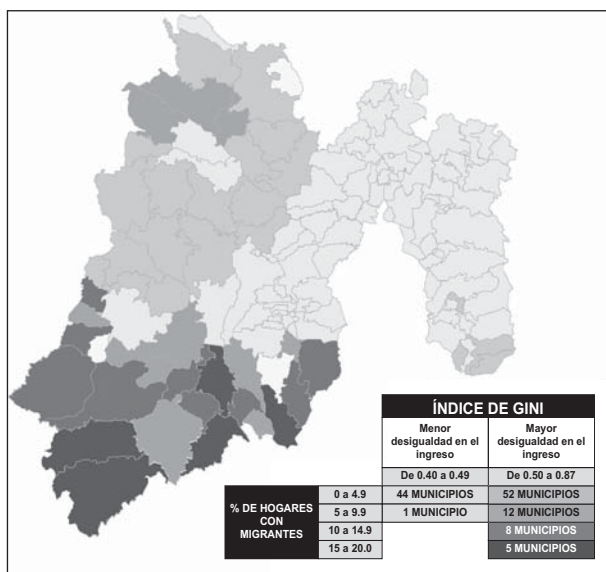
Cuadro 3
Estado de México, porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior e Índice de Desarrollo Humano

| | | Porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior | | | |
|-----------------------------|--------------|--|---|---|--|
| | | 0 - 4.9% | 5 - 9.9% | 10 - 14.9% | 15 - 20% |
| Índice de Desarrollo Humano | 0.64 - 0.749 | Villa Victoria, Villa del Carbón, Aculco, Villa de Allende, Almoloya de Juárez, Tepetlixpa, Amanalco, Temoaya, San Felipe del Progreso, Ozumba, Otzolotepec, Otumba, El Oro, Morelos, Atlautla, Jiquipilco, Jilotepec, Ixtlahuaca, Ecatzingo, Donato Guerra, Chiconcuac, Chapa de Mota | Acambay, Villa Guerrero, Tonatico, Timilpan, Temascaltepec, Temascalcingo, Sultepec, Santo Tomás, San Simón de Guerrero, Joquicingo | Texcaltitlán, Tejupilco, Otzoloapan, Almoloya de Alquisiras, Ocuilán, Malinalco, Ixtapan del Oro, Ixtapan de la Sal | Zumpahuacán, Zacualpan, Tlatlaya, Coatepec Harinas, Amatepec |
| | 0.75 - 0.87 | Valle de Chalco Solidaridad, Acolman, Cuautitlán Izcalli, Zumpango, Zinacantepec, Almoloya del Río, Xonacatlán, Valle de Bravo, Amecameca, Apaxco, Atenco, Atizapán, Atizapán de Zaragoza, Atlacomulco, Tultitlán, Axapusco, Ayapango, Calimaya, Capulhuac, Coacalco de Berriozábal, Tultepec, Cocotitlán, Coyotepec, Cuautitlán, Chalco, Toluca, Chapultepec, Chiautla, Chicoloapan, Tlalnepantla de Baz, Chimalhuacán, Tlalmanalco, Ecatepec de Morelos, Tlanguistenco, Huehuetoca, Hueypoxtla, Huixquilucan, Isidro Fabela, Ixtapaluca, Tezoyuca, Texcoco, Texcalyacac, Xalatlaco, Jaltenco, Tequixquiác, Jilotzingo, Tepotzotlán, Jocotitlán, Tepetlaoxtoc, Juchitepec, Lerma, Teotihuacán, Melchor Ocampo, Metepec, Mexicaltzingo, Teoloyucán, Naucalpan de Juárez, Nezahualcóyotl, Nextlalpan, Nicolás Romero, Nopaltepec, Ocoyoacac, Tenango del Valle, Tenango del Aire, Temascalapa, Temamatla, Tecámac, San Mateo Atenco, Papalotla, La Paz, Polotitlán, Rayón, San Antonio la Isla, San Martín de las Pirámides | Zacazonapan, Tenancingo, Soyaniquilpan de Juárez | | |

Fuente: Coordinación de Estudios y Proyectos Especiales de la Secretaría de Desarrollo Social del Estado de México a partir de datos del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo-México.

Existen 22 municipios con bajo porcentaje de migrantes a Estados Unidos e IDHs entre 0.64 y 0.749; 74 municipios más exhiben poca migración e IDHs elevados. Curiosamente, se dan los casos de Zacazonapan, Tenancingo y Soyaniquilpan de Juárez, que tienen hogares con migrantes en proporciones que oscilan entre 5 y 9.9 por ciento pero presentan niveles aceptables de desarrollo humano.

Mapa 2
Estado de México, porcentaje de migrantes en Estados Unidos
en el lustro anterior e Índice de Desarrollo Humano



Fuente: INEGI. XII Censo General de Población y Vivienda 2000.

El grupo de municipios en situación extrema es el que congrega a Zumpahuacán, Zacualpan, Tlatlaya, Coatepec Harinas y Amatepec, los cuales muestran bajos índices de desarrollo humano y alta intensidad migratoria. El segundo conjunto de municipios aglomera a Texcaltitlán, Tejupilco, Otzoloapan, Almoloya de Alquisiras, Ocuilan, Malinalco, Ixtapan del Oro e Ixtapan de la Sal, que se caracterizan por sus corrientes migratorias y menores IDHs. Le siguen: Acambay, Villa Guerrero, Tonicato, Timilpan, Temascaltepec, Temascalcingo, Sultepec, Santo Tomás, San Simón de Guerrero, Joquicingo.

El Mapa 2 explica, de una manera alternativa, los hallazgos que se describen en el Cuadro 3 anterior. La comparación de los mapas 1 y 2 es elocuente, los municipios con los mayores flujos de emigrantes y niveles de desigualdad elevados se corresponden con aquéllos que muestran desarrollo humano bajo, en referencia a la propia entidad mexiquense.

Los municipios en los que se originan las mayores corrientes migratorias hacia Estados Unidos se encuentran en el sur, oeste y noroeste del Estado de México.

3.4. Migración y marginación

El Cuadro 4 presenta el porcentaje de hogares con migrantes mexiquenses en Estados Unidos, conjuntamente con el grado de marginación. La repartición de los municipios es más refinada en comparación con los cuadros 2 y 3.

Cuadro 4
Estado de México, porcentaje de hogares con migrantes hacia Estados Unidos en el quinquenio anterior y grado de marginación

| Grado de Marginación | Porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior | | | | |
|----------------------|---|--|--|--|--|
| | 0 - 4.9% | 5 - 9.9% | 10 - 14.9% | 15 - 20% | |
| Muy Bajo | Coacalco de Berriozábal, Metepec, Cuautitlán Izcalli, Cuautitlán, Tlalneapan de Baz, Atizapán de Zaragoza | | | | |
| Bajo | Xonacatlán, Atizapán, Nextlalpan, Texcalyacac, Chimalhuacán, San Martín de las Pirámides, Jaltenco, Tultitlán, Nezahualcóyotl, Naucalpan de Juárez, Huixquilucan, Tultepec, Tecámac, Ecatepec de Morelos, Toluca, Tlaxmalaco, Texcoco, Tepotzotlán, Ixtapaluca, Teoloyucán, Melchor Ocampo, Chiconcuac, Acolman, Chicolapan, Chapultepec, La Paz, Nicolás Romero, Huehuetoca, Cocotitlán, Tezoyuca, Ocoyacoac, Capulhuac, Zumpango, Teotihuacán, Mexicaltzingo, San Mateo Atenco, Lerma, Rayón, Papalotla, Tequixquiac, San Antonio la Isla, Coyotepec, Almoloya del Río, Valle de Chalco Solidaridad, Atenco, Temamatla, Amecameca, Apaxco, Chiauita, Chalco | | | | |
| Medio | Jocotitlán, Atlacomulco, Tenango del Valle, Valle de Bravo, Axapusco, Juchitepec, Otumba, Temascalapa, Hueyoxtlá, Jilotingo, Tepetlaxpa, Nopaltepec, Polotitlán, Xaltlaaco, Zinacantanpec, Ayapango, Ozumba, Tepetlaxotoc, Tenango del Aire, Trianguisenco, Calimaya | Tenancingo, Tonatico | | | |
| Alto | Ixtlahuaca, El Oro, Ecatzingo, Jilotepec, Atlautila, Isidro Fabela, Otzoloitepec | Temascalcingo, Villa Guerrero, Santo Tomás, Timilpan, Zacazonapan, Soyaniquilpan de Juárez, Joquicingo | Tejupilco, Ocuilán, Malinalco, Ixtapan de la Sal | | |
| Muy alto | Villa Victoria, Donato Guerra, San Felipe del Progreso, Villa de Allende, Amanalco, Morelos, Aculco, Villa del Carbón, Temoaya, Almoloya de Juárez, Chapa de Mota, Jiquipilco | Sultepec, Temascaltepec, Acambay, San Simón de Guerrero | Ixtapan del Oro, Otzoloapan, Texcatitlán, Almoloya de Alquisiras | Zacualpan, Zumpahuacán, Tlatlaya, Amatepec, Coatepec Harinas | |

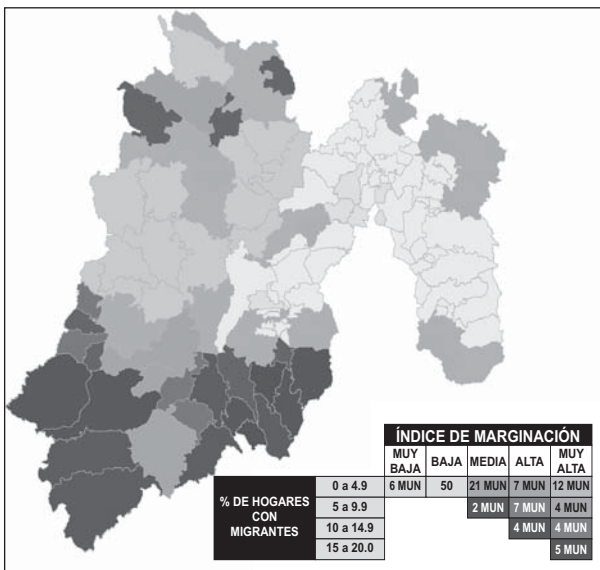
Fuente: Coordinación de Estudios y Proyectos Especiales de la Secretaría de Desarrollo Social del Estado de México a partir de datos del Consejo Estatal de Población.

-Nuevamente se aprecia que la mayor parte de las unidades de análisis observa mínimas proporciones de hogares con migrantes (entre 0 y 4.9 por ciento): 6 municipios describen grados de marginación muy bajos; 50 bajos, 21 medios; 7 altos y 12 muy altos. Los 26 municipios restantes se dispersan en los intervalos subsecuentes de migración, pero se concentran en los grados de marginación medio, alto y muy alto. Las circunscripciones situadas en el conjunto de mayor migración y muy alta marginación son: Zacualpan, Zumpahuacán, Tlatlaya, Amatepec y Coatepec Harinas. En seguida aparecen: Ixtapan del Oro, Oztoloapan, Texcaltitlán y Almoloya de Alquisiras. Un tercer grupo incluye los municipios de Tejupilco, Ocuilan, Malinalco e Ixtapan de la Sal.

En el extremo opuesto, es decir, municipios con mínimo flujo de migrantes y muy bajo grado de marginación, se encuentran Coacalco de Berriozábal, Metepec, Cuautitlán Izcalli, Cuautitlán, Tlalnepantla de Baz y Atizapán de Zaragoza.

El mapa 3 dilucida la relación entre estas dos variables desde el punto de vista geográfico.

Mapa 3
Estado de México, porcentaje de migrantes en Estados Unidos en el lustro anterior e Índice de Marginación



Fuente: INEGI. XII Censo General de Población y Vivienda 2000.

Los municipios que registran grandes proporciones de hogares con integrantes migrantes a Estados Unidos son, Coatepec Harinas (19.30 por ciento), Tlatlaya (16.31 por ciento), Zacualpan (15.56 por ciento), Amatepec (15.20 por ciento), Zumpahuacán (15.03 por ciento), Almoloya de Alquisiras (13.71 por ciento), Ixtapan de la Sal (13.07 por ciento), Texcaltitlán (12.45 por ciento), Tejupilco (11.87 por ciento), Oztoloapan (11.74 por ciento), Malinalco (11.56 por ciento), Ixtapan del Oro (10.61 por ciento) y Ocuilán (10.10 por ciento). En todos estos casos, la proporción de hogares con migrantes en el quinquenio 1995-2000 es superior a los 10 puntos porcentuales. Este primer grupo de municipios presenta coeficientes de Gini elevados, índices de desarrollo humano bajos y grados de marginación altos y muy altos.

Un segundo grupo de municipios, entre los que se encuentran San Simón de Guerrero, Temascaltepec, Villa Guerrero, Tonatico, Sultepec, Santo Tomás, Joquicingo, Zacazonapan, Soyaniquilpan de Juárez, Acambay, Tenancingo, Timilpan y Temascalcingo, recuentan proporciones de hogares con integrantes migrantes en Estados Unidos que oscilan entre 5 y 9.9 por ciento. Este conjunto se caracteriza también por tener índices de desigualdad de Gini intermedios y altos, índices de desarrollo humano bajos y grados de marginación de intermedios en adelante.

En general, es frecuente encontrar municipios altamente generadores de población migrante hacia Estados Unidos. En muchos de ellos se encuentran coeficientes de Gini elevados, indicadores de desarrollo humano bajos y grados de marginación altos y muy altos, esto en comparación con el resto de los municipios de la entidad mexicana.

Los hechos reseñados permiten prever la relación que subyace entre migración y desarrollo en los municipios y regiones del Estado de México.

4. Una aproximación econométrica a los flujos de trabajo de mexicanos hacia Estados Unidos

En esta sección se exponen los primeros resultados obtenidos con la estimación de modelos econométricos de sección cruzada que intentan explicar los mecanismos que determinan los flujos migratorios internacionales de mexicanos, concretamente los que se dirigen a Estados Unidos. A continuación se especifica la información estadística utilizada para la construcción del modelo; después, la atención se centra en los aspectos que se refieren a las evaluaciones realizadas.

4.1. Datos utilizados

Con el propósito de avanzar en la explicación del comportamiento de los flujos migratorios de trabajo de mexicanos a Estados Unidos, se estima un grupo de experimentos econométricos en concordancia con la información estadística disponible para el Estado de México. En todos los casos se trata de identificar aquellos factores a los que responden con más regularidad estas corrientes migratorias a partir del modelo gravitatorio básico.

Los modelos econométricos consideran como variable dependiente el número de emigrantes internacionales desde los municipios del Estado de México hacia Estados Unidos en el intervalo 1995-2000. Ésta es una medida de migración bruta desde el municipio mexicano i hasta el destino j , en Estados Unidos; se trata de una medida de las corrientes migratorias unidireccionales. La variable se extrae del XII Censo General de Población y Vivienda, 2000, y se presenta en niveles como corte transversal a lo largo del periodo objeto de análisis. Esto justifica el uso del modelo de regresión lineal múltiple clásico.

Entre las variables independientes utilizadas figuran, en primer lugar, la diferencia en el ingreso *per cápita* de los municipios del Estado de México con respecto al que prevalece en Estados Unidos. En segundo lugar, la distancia en kilómetros entre cada municipio mexicano y la frontera más cercana con el país del Norte. Como medida aproximada del *stock* de emigrantes, se emplea la proporción de aquéllos en situación de retorno durante el quinquenio 1995-2000. Adicionalmente, se incluyen variables explicativas sobre desarrollo, como el coeficiente de Gini, el Índice de Desarrollo Humano y el Índice de Marginación (Cuadro 5).

Cuadro 5
Estado de México, variables utilizadas

| | Variables utilizadas | Fuente |
|-----------------------------|--|--|
| Variable dependiente | Migración bruta ij: número de emigrantes internacionales desde el Estado de México hacia EU, entre 1995-2000 | XII Censo General de Población y Vivienda, 2000 |
| Variables indep. | Diferencia en el ingreso per cápita de los municipios del Estado de México con respecto al de Estados Unidos | Oficina Nacional de Desarrollo Humano, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, México. Información municipal del Índice de Desarrollo Humano (IDH) y sus componentes para el Estado de México, 2000. El ingreso per cápita en EU se obtiene de la base de datos de Summers y Heston, 1995-2000, en US\$ en promedio durante el periodo. |
| | Distancia en Km entre los municipios del Estado de México y la frontera con EU más próxima | Guía Roji (2008), Atlas turístico de carreteras |
| | Proporción de hogares con migrantes de retorno durante el quinquenio 1995-2000 | Consejo Nacional de Población |
| | Coefficiente de Gini | Tuirán (2005), La desigualdad en la distribución del ingreso monetario en México, Consejo Nacional de Población |
| | Índice de Desarrollo Humano | Oficina Nacional de Desarrollo Humano, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, México. Información municipal del Índice de Desarrollo Humano (IDH) y sus componentes para el Estado de México, 2000. |
| | Índice de Marginación | Población total, indicadores socioeconómicos, índice y grado de marginación por municipio, 2000. Consejo Estatal de Población |

4.2. Resultados esperados y especificación del modelo

Las corrientes migratorias hacia Estados Unidos que se generan desde el Estado de México corresponden a aquéllas que se describen en términos de *migración especulativa*, es decir que el trabajador decide emigrar sin disponer necesariamente de un contrato en el punto

de destino. Por tanto, no se trata del fenómeno de *migración contratada*, en la que hay un contrato de trabajo antes de que la migración se produzca, (Aroca, Hewings y Paredes, 2001).

Por otro lado, la diferencia en el ingreso entre cada municipio de la entidad mexiquense y el que se paga en EU indica la dirección del movimiento, desde las regiones con bajo o escaso crecimiento hacia el país grande que reporta bonanza económica y que, por lo tanto, ofrece mejores salarios.

El ingreso *per cápita* anual en dólares en cualquier circunscripción municipal del Estado de México evidentemente es varias veces menor al que puede obtenerse en la nación de destino. Así, las divergencias en cuanto a remuneración constituyen la fuerza que incentiva la movilidad del trabajo.

La relación entre el diferencial de ingresos y el número de migrantes es directa; consecuentemente, se espera obtener un signo positivo indicando la respuesta de los movimientos ante los desequilibrios regionales entre los municipios mexiquenses y los condados estadounidenses.

La distancia geográfica que media entre cada unidad municipal del Estado de México y la frontera con Estados Unidos configura una limitante a la migración. Tal vez esto explica por qué únicamente se mueven aquellos integrantes de los hogares y familias que se encuentran en edad productiva y plena disposición de emprender el viaje. En general, en las comunidades permanecen los dependientes económicos del migrante.

Las condicionantes de la movilidad y la magnitud de las disparidades parecen conducir a aquella solución en la que resulta óptimo para el migrante y para su familia el realizar el movimiento, aunque ello implique la separación de su núcleo familiar.

El signo esperado para la variable distancia es negativo manteniendo la lógica del modelo gravitatorio y la perspectiva de la migración como flujos de trabajo.

La variable explicativa que representa el *stock* de migrantes en la región de destino es el flujo de quienes se trasladaron anteriormente a Estados Unidos, pero que se encuentran en condición de retorno a sus municipios y comunidades de origen. Los individuos que regresan a los municipios mexiquenses proporcionan información a aquellos que desean afrontar el viaje a Estados Unidos en busca de trabajo. La información reduce la incertidumbre para los migrantes potenciales, quienes se enteran del costo de traslado, los riesgos, los contactos o

redes sociales, los puntos de destino más adecuados, etc. La teoría económica de la migración señala que el signo esperado de esta relación es positivo.

La extensión al modelo gravitatorio que se busca reproducir en este documento incluye el coeficiente de Gini, que alude al grado de desigualdad en la distribución del ingreso que impera en los municipios mexiquenses. Se anticipa que el signo sea positivo, indicando que mayor inequidad aviva la migración. Algo similar debe ocurrir en el caso del Índice de Marginación. En cambio, la inclusión del Índice de Desarrollo Humano supone una relación inversa con el número de migrantes.

En especial, las variables IDH e Índice de Marginación se refieren al suministro o disponibilidad de ciertos bienes públicos; por ejemplo, el IDH indica si en los municipios existe acceso a la educación, la salud y el nivel de ingreso. Si el municipio cuenta con estos satisfactores, la intensidad migratoria es baja; en cambio, si no se dispone de tales bienes públicos, el incentivo a emigrar es más alto y se genera una mayor corriente de emigrantes hacia los Estados Unidos. Algo similar ocurre con el Índice de Marginación, que se construye con variables tales como la disponibilidad de agua potable, piso firme, drenaje, electricidad, número de habitaciones en la vivienda, hacinamiento, etc. los cuales también son bienes públicos. El IDH y el Índice de Marginación son *proxys* de lo que en la literatura sobre migraciones se conoce como amenidades (*amenities*). Si esto es así, entonces los coeficientes a estimar deben señalar qué tanto se emigra desde los municipios, como consecuencia de la disponibilidad (o carencia) de estos bienes y servicios públicos (o amenidades).

La especificación econométrica es la siguiente:

$$GM = \beta_0 + \beta_1 Desarr + \beta_2 DifIng + \beta_3 Distancia + \beta_4 Retorno + \varepsilon \quad (4)$$

Donde: los coeficientes β son los parámetros a estimar; *GM* es la migración bruta entendida en el sentido de flujo migratorio unidireccional; *Desarr* es la variable de desarrollo local: se utilizan alternadamente el Coeficiente de Gini, el Índice de Desarrollo Humano y el Índice de Marginación; *DifIng* mide la diferencia en el ingreso *per cápita* anual en dólares entre los municipios mexiquenses y el existente en Estados Unidos, que se evalúa en términos relativos como la proporción del ingreso del municipio *i* respecto de ingreso en el destino *j* (EU); el regresor *Distancia* es medido en kilómetros desde cada municipio y la frontera más cercana con el país del Norte; *Retorno* se refiere a la migración de regreso como *proxy* del *stock* de migrantes; finalmente, ε es el término de error ruido blanco.

4.3. Resultados econométricos

En el Cuadro 6 se presentan los resultados de 3 modelos econométricos. En todos los casos, los parámetros estimados son coeficientes beta, también conocidos como coeficientes estandarizados¹⁶. Las regresiones se calculan bajo errores estándar robustos.

Cuadro 6
Estado de México, regresiones en niveles del número de migrantes internacionales mexiquenses durante el periodo 1995-2000

| Variables independientes | Ec. 1 | Ec. 2 | Ec. 3 |
|--|---------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Coefficiente de Gini | 0.1835** (187.8157) | | |
| Índice de Desarrollo Humano | | -0.3729** (949.6483) | |
| Índice de Marginación | | | 0.2312** (34.9647) |
| Diferencia en el ingreso per cápita de los municipios del Estado de México con respecto al de Estados Unidos | 0.3409*** (0.0133) | 0.5586*** (0.02389) | 0.4203** (0.0186) |
| Distancia de los municipios a la frontera más próxima con Estados Unidos | -0.0928** (0.3241) | -0.1571** (0.4708) | -0.1274* (0.4701) |
| Hogares con migrantes de retorno durante el quinquenio 1995-2000 | 0.7633*** (0.1284) | 0.7737*** (0.1245) | 0.7801*** (0.1281) |
| Cons. | 1938.185*** (485.6844) | 5827.558*** (1800.15) | 2905.413 (931.413) |
| Nº. de observaciones | 122 | 122 | 122 |
| R2 | 0.8815 | 0.8825 | 0.8733 |
| F | 35.18 | 44.03 | 42.49 |
| Prob. F | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

*** Significancia al 99%; ** Significancia al 95%; * Significancia al 90%.

Las regresiones se calculan bajo errores estándar robustos a heteroscedasticidad. Entre paréntesis aparece el error estándar.

De la ecuación 1 se desprende lo siguiente:

El signo del Coeficiente de Gini es positivo y estadísticamente significativo. La magnitud de la relación, manteniendo todo lo demás constante, indica que, si la desigualdad en la

¹⁶ Los coeficientes estandarizados miden el cambio de la variable dependiente ante un cambio en alguno de los regresores en términos de desviaciones estándar. Un tratamiento más detallado de este tipo de parámetros puede consultarse en Wooldridge (2000).

distribución del ingreso aumenta en una desviación estándar, el número de migrantes mexiquenses a Estados Unidos se incrementa en 0.1835 desviaciones estándar.

Este primer resultado sugiere que para aminorar esta corriente migratoria es necesario implementar políticas tendientes a mejorar la equidad en el ingreso en las demarcaciones municipales del Estado de México. Un crecimiento económico constante y duradero revertiría las brechas de ingreso entre pobres y ricos.

En segundo lugar, el número de migrantes responde positivamente a la diferencia en el ingreso *per cápita* anual en dólares entre los municipios mexiquenses y el ingreso promedio que puede percibirse en la nación vecina del norte de México. Manteniendo la condición *ceteris paribus*, el coeficiente es estadísticamente significativo. La dimensión de la relación apunta a que un incremento en el diferencial de ingresos, en términos de desviaciones estándar, genera un aumento en el número de migrantes internacionales de 0.34 unidades de desviación estándar.

Por otra parte, y tal como se esperaba, el signo del coeficiente de la variable explicativa distancia resultó negativo y significativo, confirmando el argumento de que dicho regresor opera restringiendo las corrientes migratorias. Si la distancia aumenta, el número de migrantes mexiquenses con destino en Estados Unidos se reduce en casi una décima de desviación estándar.

La presencia de migrantes de retorno contribuye a explicar la persistencia de los flujos migratorios. La relación es directa y significativa, un aumento de los hogares con migrantes de retorno origina un incremento en el número de migrantes en una magnitud de 0.76 desviaciones estándar.

El coeficiente de correlación es de 0.8815, indicando que las variables exógenas explican a la variable endógena en un 88 por ciento. El valor del estadístico F (35.18) corrobora la significancia conjunta de las variables incluidas en la regresión.

Las ecuaciones 2 y 3 reportan los siguientes resultados relevantes:

En primer lugar, el signo del coeficiente del IDH es negativo y significativo. Si mejora el desarrollo humano, el flujo de migrantes internacionales que se dirigen a Estados Unidos disminuye en -0.37 desviaciones estándar, es decir, en poco más de un tercio.

El mensaje es claro: se debe adoptar políticas públicas que permitan mejorar el acceso a bienes y servicios públicos como la salud y la educación; asimismo, se debe asegurar a la población oportunidades de empleo que garanticen ingresos suficientes para lograr una vida en condiciones dignas. Un mejor desarrollo humano desincentiva las corrientes migratorias internacionales de mexiquenses por motivos de trabajo. Por ello, las acciones de política deben enfatizar el mejoramiento del desarrollo humano.

La regresión 3 señala que un aumento en el Índice de Marginación en una desviación estándar produce un aumento en el número de migrantes a EU de 0.23 desviaciones estándar. La asociación entre ambas variables, es positiva y significativa.

Las variables explicativas restantes de las ecuaciones 2 y 3 reportan signos y significancia estadística consistentes con lo que predice el modelo gravitatorio y el modelo que observa la migración en el sentido de flujos de trabajo.

Los coeficientes de correlación R^2 son muy cercanos al 90 por ciento de explicación; por su parte, los valores del estadístico F revelan la importancia conjunta de las variables exógenas.

5. Conclusiones

Este estudio ha hecho referencia al tema de la migración que se origina en las diferentes regiones y municipios del Estado de México y que tiene como destino los Estados Unidos de Norteamérica, en el periodo 1995-2000. El objetivo se ha centrado en determinar si variables como el Coeficiente de Gini, el Índice de Desarrollo Humano y el Índice de Marginación contribuyen en la explicación de los flujos migratorios con destino a ese país.

El análisis de la información descriptiva ha permitido la identificación de aquellas regiones y municipios del Estado de México, en concreto, que se caracterizan por sus flujos de trabajo hacia Estados Unidos y los diferentes grados de intensidad migratoria con las que esto ha venido ocurriendo.

El documento utiliza el modelo gravitatorio de la migración, extendiéndolo a las tres variables de desarrollo local ya señaladas a través de experimentos econométricos de corte transversal o sección cruzada. Los resultados más relevantes se comentan a continuación.

Las regiones del Estado de México que reportan los mayores porcentajes promedio de hogares con migrantes en Estados Unidos en el periodo de análisis son: la X, Tejupilco; la

VI, Ixtapan de la Sal y XV, Valle de Bravo. Estas tres circunscripciones se encuentran al sur de la entidad mexiquense y muestran un bajo desarrollo en comparación con otras zonas del Estado; por ejemplo, en el año 2000, únicamente concentraron, en conjunto, el 2.38 por ciento del producto interno bruto estatal.

En la región X, Tejupilco, en el año 2000, el 24.7 por ciento de la población mayor de 15 años era analfabeta; el 49 por ciento no había terminado la primaria; el 54 por ciento habitaba en viviendas con algún nivel de hacinamiento y el 60.3 por ciento de la población percibía ingresos de hasta 2 salarios mínimos. Esto de acuerdo con cifras del XII Censo de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

En el mismo año, la Región VI, Ixtapan de la Sal reporta un 15 por ciento de población analfabeta; el 42.8 por ciento de los mayores de 15 años de edad manifiesta tener primaria incompleta; el 58.9 por ciento del total de su población vive con algún grado de hacinamiento y el 68.2 por ciento de los ocupados gana menos de 2 salarios mínimos.

La situación en la región XV, Valle de Bravo no es muy diferente: un 21.5 por ciento de la población que supera los 15 años de edad es analfabeta; el 51.8 por ciento no terminó la primaria; el 63.9 por ciento del total de sus habitantes muestra alguna forma de hacinamiento en su vivienda, y el 63.5 por ciento de los económicamente activos ocupados obtiene ingresos de hasta dos salarios mínimos.

Algunas de estas características sociodemográficas operan como incentivos a la migración con destino a Estados Unidos en el caso de las tres regiones mencionadas.

En el otro extremo aparecen las regiones con las menores proporciones de hogares con individuos migrantes hacia Estados Unidos, destacando, por ejemplo: VII, Lerma; XI, Texcoco; XIII, Toluca; IV, Cuautitlán Izcalli; XIII Bis, Metepec y VIII, Naucalpan. Lo que distingue a este grupo de regiones es, por un lado, la presencia de sectores productivos manufactureros y de servicios relativamente desarrollados y con cierta orientación exportadora; por otro, algunas de estas regiones se localizan geográficamente en contigüidad (o con alguna proximidad) con el Distrito Federal, formando parte, incluso, en ciertos casos, de su zona metropolitana.

La zona metropolitana de la ciudad de México, capital del país, constituye el mercado de trabajo más importante de todo el país, es una de las ciudades más pobladas del mundo, y ejerce sus propias fuerzas centrípetas, especialmente con los municipios mexiquenses.

La presentación de algunos mapas sobre migración, en combinación con los niveles de desigualdad municipal, de desarrollo humano y de marginación, corroboran los hallazgos descriptivos del documento.

La segunda parte del estudio avanza al introducir algunos resultados econométricos que dan cuenta de los flujos migratorios de mexiquenses hacia los Estados Unidos de Norteamérica. Como ya se ha señalado, se aplica el modelo gravitatorio de la migración para explicar el sentido, dirección y magnitud de los flujos de trabajo con destino al país del Norte. La especificación econométrica extiende el modelo teórico utilizado, a efecto de tomar en cuenta la posible relación de causalidad que ejercen la desigual distribución del ingreso en los municipios, el grado alcanzado en cuanto a desarrollo humano y los niveles de marginación.

Los resultados de aplicación econométrica sugieren que un aumento en la desigualdad en la distribución del ingreso monetario originaría un incremento en los flujos de trabajadores del Estado de México hacia los Estados Unidos. La causalidad es positiva y, significativa desde el punto de vista estadístico. De igual manera ocurre con el Índice de Marginación. En cambio, una variación positiva en el Índice de Desarrollo Humano de los municipios causaría una reducción en las corrientes migratorias.

Los flujos de trabajo de oriundos del Estado de México en Estados Unidos responden positivamente a las diferencias salariales con respecto a las que prevalecen en aquella nación. En todas las regresiones estimadas se corrobora el signo positivo de la correlación y la significancia estadística.

En el caso de la distancia, se confirma que ésta actúa como limitante a la migración de mexiquenses hacia Estados Unidos. Un aumento de la distancia reduce sustancialmente el flujo de trabajo hacia aquel país, significando un *proxy* de los costos en que incurre el migrante con el movimiento. La distancia justifica la migración de algún integrante de la familia y la permanencia de los otros miembros de la unidad familiar en el lugar en el que se produce el movimiento.

La variable que alude al *stock* de migrantes (en este caso, el flujo de migrantes de retorno a los municipios y comunidades mexiquenses) muestra signo positivo y significancia estadística relevante. Esto quiere decir que los integrantes que regresan a casa, transmiten información a los migrantes potenciales, lo que favorece la movilidad.

Las redes y vínculos sociales que construyeron aquellos que se fueron en el pasado y que poco a poco van regresando son claramente aprovechados por aquellos que se encuentran en edad productiva y que, al no encontrar oportunidades localmente, simplemente se lanzan a Estados Unidos en demanda de trabajo. Tal vez por ello se aprecia mayor incidencia de migrantes en algunos municipios desiguales, con menor desarrollo humano y más marginación, en comparación con otros en condiciones similares pero que observan menores corrientes migratorias. Puede citarse, por ejemplo, el caso de Temoya, sólo por mencionar alguno.

El *stock* de migrantes deja entrever la existencia de un grupo de trabajadores mexiquenses que se mueven recurrentemente entre su municipio de origen y cualquier destino en los Estados Unidos. Este flujo circular de trabajadores se encuentra en constante movimiento a través de los mecanismos que motivan la migración circular por razones de trabajo.

Los resultados encontrados en este estudio sugieren que, para reducir el flujo de migrantes mexiquenses hacia los Estados Unidos es necesario implementar políticas públicas tendientes a reducir la desigual distribución del ingreso y aquellas orientadas a mejorar el desarrollo humano y a disminuir la marginación. En otras palabras, hay que establecer las condiciones que permitan ampliar las oportunidades de acceso a la educación, la salud, el empleo, la seguridad social, la vivienda, etc., entre los habitantes de la entidad. A nivel macroeconómico, es deseable asegurar condiciones de crecimiento económico más estables y duraderas.

La línea de investigación sobre este tema debe profundizarse, a fin de contar con un mayor conocimiento acerca de este fenómeno. Concretamente, se deberían realizar estudios que analicen la migración internacional de mexiquenses a partir de bases de información que combinen datos de corte transversal y de series de tiempo. Hace falta esclarecer el comportamiento del modelo gravitatorio cuando se agregan otras variables explicativas; alternativamente pueden analizarse los flujos de emigrantes bajo otros enfoques teóricos. Otro campo de análisis relacionado tiene que ver con la migración interestatal de mexiquenses y con la intermunicipal, para establecer los patrones que gobiernan la movilidad del trabajo al interior del país y del propio Estado de México, etc.

Artículo recibido en: julio de 2010

Manejado por: ABCE

Aceptado en: febrero de 2011

Referencias

1. Aroca, P, G., J. D. Hewings y G. J. Paredes (2001). "Migración interregional y el mercado laboral en Chile: 1977-1982 y 1987-1992". *Cuadernos de Economía*, (115) 321-345.
2. Baldwin, A. R. Forslid, R. Martin, G. P. Ottaviano y F. Robert-Nicoud (2003). *Economic Geography and Public Policy*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
3. Banco de México (2008). Base de datos en línea. Disponible en: <http://www.banxico.org.mx/>
4. Carrasco C., C. (1999). "Mercados de trabajo: los inmigrantes económicos". Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, IMSERSO, Colección Observatorio Permanente de la Inmigración, N° 4. Madrid.
5. Center for International Comparisons at the University of Pennsylvania (1990). El ingreso *per cápita* en Estados Unidos. Base de datos en línea. Disponible en: <http://pwt.econ.upenn.edu/>
6. Consejo Estatal de Población (2000). Índice y grado de marginación por municipio, 2000. Base de datos en línea. Disponible en: <http://www.edomex.gob.mx/portal/page/portal/coespo/>
7. Consejo Nacional de Población. *Encuesta sobre migración en la frontera Norte de México (EMIF)*, Varios años. Base de datos en línea. Disponible en: http://www.conapo.gob.mx/mig_int/3.htm
8. Consejo Nacional de Población (2008): *Glosario*. Disponible en: <http://conapo.gob.mx/>
9. Cortés, F. y R. M. Rubalcaba (1984). *Técnicas estadísticas para el estudio de la desigualdad social*. El Colegio de México.
10. Cortés, F. (2002). "Consideraciones sobre la marginalidad, marginación, pobreza y desigualdad en la distribución del ingreso". *Papeles de población*, (31), 9-24.

11. De la Fuente, A. (1999). "La dinámica territorial de la población española: un panorama y algunos resultados provisionales." *Revista de Economía Aplicada* (20), 53-108.
12. Domínguez G., R. y H. Zuleta (2006). "Remesas y desarrollo económico. Un análisis empírico del caso mexicano". Documento de trabajo N°. 5, Facultad de Economía, Universidad del Rosario.
13. González B., J. G. (1998). "Migración laboral hacia Estados Unidos de los oriundos del Estado de México". *Papeles de población*, (17), 107-137.
14. González, B., J. G. (2002). "Migración laboral internacional del Estado de México". Universidad Autónoma del Estado de México: Coordinación General de Investigación y Estudios Avanzados, Centro de Investigación y Estudios Avanzados de la Población, Toluca, México.
15. González B., J. G. (2006). Migración y remesas en el sur del Estado de México. *Papeles de Población*, (50), 223-252.
16. Greenwood, M.J. (1975). "Research on Internal Migration in the United States: A Survey". *Journal of Economic Literature*, 13(2), 397-433.
17. Greenwood, M.J. (1985). "*Human Migration: Theory Models, and Empirical Studies*". *Journal of Regional Science*, 25(4), 521-544.
18. Guía Roji (2008). *Atlas turístico de carreteras*, México.
19. Hypergé (2004). *Enciclopedia electrónica*. Disponible en: http://www.hypergeo.eu/article.php3?id_article=168
20. Instituto de Información e Investigación Geográfica Estadística y Catastral (2008). *Producto Interno Bruto municipal*. Disponible en: <http://igecem.edomex.gob.mx/>
21. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2000). *XII Censo General de Población y Vivienda*, México.
22. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, Varios años): *Anuario Estadístico del Estado de México*, México.

23. Lewis, W.A. (1954). "Desarrollo económico con oferta ilimitada de mano de obra". *El trimestre económico*, (108), 629-673. México: F.C.E.
24. Loza T, M., Vizcarra, B. I., Lutz B, B. y Quintanar G., E. (2007). "Jefaturas de hogar. El desafío femenino ante la migración transnacional masculina en el sur del Estado de México". *Migraciones Internacionales*, 4(2), 33-60.
25. Medina, F. (2001). "Consideraciones sobre el índice de Gini para medir la concentración del ingreso". Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile.
26. Mendoza C., J. E. (2006). "Determinantes macroeconómicos regionales de la migración mexicana". *Migraciones Internacionales*, 3(4), 118-145.
27. Oficina Nacional de Desarrollo Humano, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (2000). *Índice de desarrollo humano municipal, 2000-2005*. México. Disponible en: <http://www.undp.org.mx/>
28. Pérez de Armiño, K. (2000). *Diccionario de acción humanitaria y cooperación al desarrollo*. España: Icaria Editorial y Hegoa, España. Disponible en: <http://dicc.hegoa.efaber.net/>
29. Pfaffenbach, B. (2007). "Cumbre G-8 en Heiligendamm" *Foro de política, cultura y economía*, (3), 15-19. *Deutschland*
30. Reyes T, A. M. y Mur L., J. (2008). "Pautas recientes de la movilidad laboral entre las provincias españolas. Periodo 2001-2006". *Investigaciones regionales*. Asociación Española de Ciencia Regional, (13) 85-113. Barcelona, España.
31. Santibáñez, J. (2004). "El saldo social de la emigración hacia Estados Unidos". Conferencia magistral (mimeo).
32. Shields, G. M. y M. P. Shields (1989). "The Emergence of Migration Theory and A Suggested New Direction". *Journal of Economic Surveys*, 3(4), 277-304.
33. Sjaastad, L. (1962). "The Costs and Returns of Human Migration". *Journal of Political Economy*, 84(4), 701-719.

34. Schwartz, A. (1973). "Interpreting the Effect of Distance on Migration". *Journal of Political Economy*, 81(5), 1153-1169.
35. Schwartz, A. (1976). "*Migration, Age and Education*". *Journal of Political Economy*, 70(5), 80-93.
36. Todaro, M.J. (1969). "*A Model of Labor Migration and Urban Unemployment in Less Developed Countries*". *American Economic Review*, 59(1), 138-148.
37. Tuirán G., A. (2005). *La desigualdad en la distribución del ingreso monetario en México*. Consejo Nacional de Población, México.
38. Wikipedia (2001). *La enciclopedia libre*, Wikipedia Foundation Inc. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/>
39. Wooldridge, J. M. (2000). *Introducción a la econometría*. México: Thomson Learning.

Anexo I: Estado de México, porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior y Coeficiente de Gini por región

| Región | Índice de Gini | Porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior | | | |
|--------------------------|----------------|---|---|------------|----------|
| | | 0 - 4.9% | 5 - 9.9% | 10 - 14.9% | 15 - 20% |
| I Ameameca | 0.4 - 0.49 | Tlalmalcalco, Tenango del Aire, Temamatla, Ozumba, Juchitepec, Chalco, Cocotitlán | | | |
| | 0.5 - 0.87 | Valle de Chalco Solidaridad, Tepetlaxpa, Ecatzingo, Ayapango, Atiautla, Amecameca | | | |
| II Atzacmulco | 0.4 - 0.49 | Poloititlán, Jacotitlán | | | |
| | 0.5 - 0.87 | San Felipe del Progreso, El Oro, Aculco, Morelos, Jilotepec, Ixtlahuaca, Chapa de Mota, Atlacomulco | Acambay, Timilpan, Temascalcingo, Soyamiquilpan de Juárez | | |
| III Chimalhuacán | 0.4 - 0.49 | Ixtapaluca, Chimalhuacán, Chicoloapan | | | |
| | 0.5 - 0.87 | La Paz | | | |
| IV Cuautitlán Izcalli | 0.4 - 0.49 | Tepotzotlán, Huehuetoca, Coyotepec | | | |
| | 0.5 - 0.87 | Cuautitlán Izcalli, Villa del Carbón | | | |

| | | | | | | |
|-------------------------|------------|--|--|---|--|--|
| V Ecatepec | 0.4 - 0.49 | Tecámac, Ecatepec de Morelos | | | | |
| | 0.5 - 0.87 | | | | | |
| V Bis Otumba | 0.4 - 0.49 | Teotihuacán, Acolman, Temascalapa, Otumba, Nopaltepec | | | | |
| | 0.5 - 0.87 | San Martín de las Pirámides, Axapusco | | | | |
| VI Ixtapan de la Sal | 0.4 - 0.49 | | Tenancingo | | | |
| | 0.5 - 0.87 | | Villa Guerrero, Tonatico, Temascaltepec, Sultepec, San Simón de Guerrero, Joquicingo | Texcaltitlán, Ocuilán, Malinalco, Almoloya de Alquisiras, Ixtapan de la Sal | Zumpahuacán, Zacualpan, Coatepec Harinas | |
| VII Lerma | 0.4 - 0.49 | San Mateo Atenco, Otzolotepec, Ocoyoacac | | | | |
| | 0.5 - 0.87 | Xonacatlán, Trianguistenco, Temoaya, Lerma, Jiquipilco, Xalatlaco, Capulhuac, Atizapán | | | | |
| VIII Naucalpan | 0.4 - 0.49 | Nicolás Romero, Jilotzingo, Isidro Fabela | | | | |
| | 0.5 - 0.87 | Naucalpan de Juárez, Huixquilucan | | | | |
| IX Nezahualcóyotl | 0.4 - 0.49 | | | | | |
| | 0.5 - 0.87 | Nezahualcóyotl | | | | |

| | | | | | | | |
|------------------|------------|---|--|--|-----------|--|--------------------|
| X Tejupilco | 0.4 - 0.49 | | | | | | |
| | 0.5 - 0.87 | | | | Tejupilco | | Tlatlaya, Amatepec |
| XI Texcoco | 0.4 - 0.49 | Tezoyuca, Tepetitlaotoc, Chiconcuac, Atenco | | | | | |
| | 0.5 - 0.87 | Texcoco, Papalotla, Chiautla | | | | | |
| XII Tlalnepantla | 0.4 - 0.49 | | | | | | |
| | 0.5 - 0.87 | Tlalnepantla de Baz, Atizapán de Zaragoza | | | | | |
| XIII Toluca | 0.4 - 0.49 | | | | | | |
| | 0.5 - 0.87 | Zinacantepec, Toluca, Almoloya de Juárez | | | | | |
| XIII Bis Metepec | 0.4 - 0.49 | San Antonio la Isla, Chapultepec, Almoloya del Río | | | | | |
| | 0.5 - 0.87 | Texcalyacac, Tenango del Valle, Rayón, Mexicaltzingo, Metepec, Cullimaya | | | | | |
| XIV Tultitlán | 0.4 - 0.49 | Tultitlán, Tultepec, Teoloyucán, Melchior Ocampo, Coacalco de Berriozábal | | | | | |
| | 0.5 - 0.87 | Cuautitlán | | | | | |

| | | | | | |
|-------------------|------------|---|--------------------------|-----------------------------|--|
| XV Valle de Bravo | 0.4 - 0.49 | | | | |
| | 0.5 - 0.87 | Villa Victoria, Villa de Allende, Valle de Bravo, Donato Guerra, Amanalco | Zacazonapan, Santo Tomás | Otzoloapan, Ixtapan del Oro | |
| XVI Zumpango | 0.4 - 0.49 | Zumpango, Tequixquiac, Jaltenco, Apaxco | | | |
| | 0.5 - 0.87 | Nextlalpan, Hueypoxtla | | | |

Fuente: Coordinación de Estudios y Proyectos Especiales de la Secretaría de Desarrollo Social del Estado de México a partir de datos del Consejo Nacional de Población.

Anexo 2: Estado de México, porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior e Índice de Desarrollo Humano por región

| | | Porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior | | | | |
|------------------|-----------------------------|---|----------------------------------|------------|----------|--|
| | | 0 - 4.9% | 5 - 9.9% | 10 - 14.9% | 15 - 20% | |
| Región | Índice de Desarrollo Humano | 0.64 - 0.749 | | | | |
| | I Amecameca | Tepetitlaxpa, Ozumba, Ecatzingo, Atlautila | | | | |
| II Atlacomulco | | Valle de Chalco Solidaridad, Tlamanalco, Tenango del Aire, Temamatla, Juchitepec, Chalco, Cocotitlán, Ayapango, Amecameca | | | | |
| | | San Felipe del Progreso, El Oro, Aculco, Morelos, Jilotepec, Ixtahuaca, Chapa de Mota | Acambay, Timilpan, Temascalcingo | | | |
| III Chimalhuacán | | Polotitlán, Jocoititlán, Atlacomulco | Soyaniquilpan de Juárez | | | |
| | | La Paz, Ixtapaluca, Chimalhuacán, Chicoloapan | | | | |

| | | | | | | |
|-----------------------|--------------|--|---|---|--|--|
| IV Cuautitlán Izcalli | 0.64 - 0.749 | Villa del Carbón | | | | |
| | 0.75 - 0.87 | Cuautitlán Izcalli, Tepotzotlán, Huehuetoca, Coyatepec | | | | |
| V Ecatepec | 0.64 - 0.749 | | | | | |
| | 0.75 - 0.87 | Tecámac, Ecatepec de Morelos | | | | |
| V Bis Otumba | 0.64 - 0.749 | Otumba | | | | |
| | 0.75 - 0.87 | Teotihuacán, Acolman, Temascalapa, San Martín de las Pirámides, Nopaltepec, Axapusco | | | | |
| VI Ixtapan de la Sal | 0.64 - 0.749 | | Villa Guerrero, Tonalco, Temascaltepec, Sultepec, San Simón de Guerrero, Joquicingo | Texcallitlán, Ocuilán, Malinalco, Almoloya de Alquisiras, Ixtapan de la Sal | Zumpahuacán, Zacualpan, Coatepec Harinas | |
| | 0.75 - 0.87 | Tenancingo | | | | |
| VII Lerma | 0.64 - 0.749 | Temoaya, Otzolotepec, JiQUIPILCO | | | | |
| | 0.75 - 0.87 | Xonacatlán, Tianguistenco, San Mateo Atenco, Ocoyoacac, Lerma, Xaltlaco, Capulhuac, Atizapán | | | | |

| | | | | | | |
|-------------------|-----------------|---|--|-----------|--|--------------------|
| VIII Naucalpan | 0.64 - 0.749 | | | | | |
| | 0.75 - 0.87 | Nicolás Romero, Naucalpan de Juárez, Jilizingo, Isidro Fabela, Huixquilucan | | | | |
| IX Nezahualcóyotl | 0.64 - 0.749 | | | | | |
| | 0.75 - 0.87 | Nezahualcóyotl | | | | |
| X Tejupilco | 0.64 - 0.749 | | | | | |
| | 0.75 - 0.87 | | | Tejupilco | | Tlatlaya, Amatepec |
| XI Texcoco | 0.64 - 0.749 | Chiconcuac | | | | |
| | 0.75 - 0.87 | Tezoyuca, Texcoco, Tepetitla, Atenco, Papalotla, Chiautla, Atenco | | | | |
| XII Tlalnepantla | 0.64 - 0.749 | | | | | |
| | 0.75 - 0.87 | Tlalnepantla de Baz, Atizapán de Zaragoza | | | | |
| XIII Toluca | 0.64 - 0.749 | Almoloya de Juárez | | | | |
| | 0.75 - 0.87 | Zinacantepec, Toluca | | | | |

| | | | | | | |
|-------------------|--------------|---|-------------|----------------------------|--|--|
| XIII Bis Metepec | 0.64 - 0.749 | | | | | |
| | 0.75 - 0.87 | Texcalyacac, Tenango del Valle, San Antonio la Isla, Rayón, Mexicalzingo, Almoloya del Río, Metepec, Chapultepec, Callimaya | | | | |
| XIV Tultitlán | 0.64 - 0.749 | | | | | |
| | 0.75 - 0.87 | Tultitlán, Tultepec, Teoloyucán, Melchor Ocampo, Cuautitlán, Coacalco de Berriozábal | | | | |
| XV Valle de Bravo | 0.64 - 0.749 | Villa Victoria, Villa de Allende, Donato Guerra, Amanalco | Santo Tomás | Otzolapan, Ixtapan del Oro | | |
| | 0.75 - 0.87 | Valle de Bravo | Zacazonapan | | | |
| XVI Zumpango | 0.64 - 0.749 | | | | | |
| | 0.75 - 0.87 | Zumpango, Tequixquiac, Nextlalpan, Jalisco, Hueyapoxtla, Apaxco | | | | |

Fuente: Coordinación de Estudios y Proyectos Especiales de la Secretaría de Desarrollo Social del Estado de México a partir de datos del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo-México.

Anexo 3: Estado de México, porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior e Índice de Marginación

| Región | Grado de Marginación | Porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior | | | |
|-----------------------|----------------------|--|--|------------|----------|
| | | 0 - 4,9% | 5 - 9,9% | 10 - 14,9% | 15 - 20% |
| I Amecameca | Muy Bajo | | | | |
| | Bajo | Chalco, Amecameca, Temamatla, Valle de Chalco Solidaridad, Cocotitlán, Tlatmanalco | | | |
| | Medio | Juchitepec, Tepetlixpa, Ayapango, Ozumba, Tenango del Aire | | | |
| | Alto | Ecatzingo, Atlatitla | | | |
| | Muy alto | | | | |
| | Muy Bajo | | | | |
| | Bajo | | | | |
| II Atiacomulco | Medio | Jocotitlán, Atiacomulco, Polotitlán | | | |
| | Alto | Ixtlahuaca, El Oro, Jiloteppec | Temascalcingo, Timilpan, Soyaniquilpan de Juárez | | |
| | Muy alto | San Felipe del Progreso, Morelos, Aculco, Chapa de Mota | Acambay | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

| Región | Grado de Marginación | Porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior | | | | |
|-----------------------------|----------------------|---|----------|------------|----------|--|
| | | 0 - 4.9% | 5 - 9.9% | 10 - 14.9% | 15 - 20% | |
| III Chimalhuacán | Muy Bajo | | | | | |
| | Bajo | Chimalhuacán, La Paz, Chicolocapan, Ixtapaluca | | | | |
| | Medio | | | | | |
| | Alto | | | | | |
| | Muy alto | | | | | |
| IV Cuautitlán Izcalli | Muy Bajo | Cuautitlán Izcalli | | | | |
| | Bajo | Coyotepec, Huehuetoca, Tepotzotlán | | | | |
| | Medio | | | | | |
| | Alto | | | | | |
| | Muy alto | Villa del Carbón | | | | |
| V Ecatepec | Muy Bajo | | | | | |
| | Bajo | Ecatepec de Morelos, Tecámac | | | | |
| | Medio | | | | | |
| | Alto | | | | | |
| | Muy alto | | | | | |

| Región | Grado de Marginación | Porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior | | | |
|-----------------------------|----------------------|---|--|---------------------------------------|--|
| | | 0 - 4.9% | 5 - 9.9% | 10 - 14.9% | 15 - 20% |
| V Bis Otumba | Muy Bajo | | | | |
| | Bajo | San Martín de las Pirámides, Teotihuacán, Acolman | | | |
| | Medio | Axapusco, Otumba, Tamascalapa, Nopaltepec | | | |
| | Alto | | | | |
| | Muy alto | | | | |
| | Muy Bajo | | | | |
| | Bajo | | | | |
| | Medio | | Tenancingo, Tonatico | | |
| VI Ixtapan de la Sal | Alto | | Villa Guerrero, Joquicingo | Ocuilán, Malinalco, Ixtapan de la Sal | |
| | Muy alto | | Sultepec, Tamascaltepec, San Simón de Guerrero | Texcaltitlán, Almoloya de Alquisiras | Zacualpan, Zumpahuacán, Coatepec, Hairinas |

| Región | Grado de Marginación | Porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior | | | | |
|-------------------|----------------------|---|----------|------------|----------|--|
| | | 0 - 4.9% | 5 - 9.9% | 10 - 14.9% | 15 - 20% | |
| VII Lerma | Muy Bajo | | | | | |
| | Bajo | Xonacatlán, Atizapán, Lerma, San Mateo Atenco, Capulhuac, Ocoyoacac | | | | |
| | Medio | Xalatlaco, Tianguistenco | | | | |
| | Alto | Otzolotepec | | | | |
| | Muy alto | Temoaya, Jiquipilco | | | | |
| | Muy Bajo | | | | | |
| | Bajo | Nicolás Romero, Huixquilucan, Naucalpan de Juárez | | | | |
| VIII Naucalpan | Medio | Jilotzingo | | | | |
| | Alto | Isidro Fabela | | | | |
| | Muy alto | | | | | |
| | Muy Bajo | | | | | |
| | Bajo | Nezahualcóyotl | | | | |
| IX Nezahualcóyotl | Medio | | | | | |
| | Alto | | | | | |
| | Muy alto | | | | | |
| | Muy alto | | | | | |

| Región | Grado de Marginación | Porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior | | | | |
|--------------------------|----------------------|---|----------|------------|-----------------------|--|
| | | 0 - 4.9% | 5 - 9.9% | 10 - 14.9% | 15 - 20% | |
| X Tejupitco | Muy Bajo | | | | | |
| | Bajo | | | | | |
| | Medio | | | | | |
| | Alto | | | Tejupitco | | |
| | Muy alto | | | | Tlatlaya, Amatepec | |
| XI Texcoco | Muy Bajo | | | | | |
| | Bajo | Chiautla, Atenco, Papalotla, Tezoyuca, Chiconcuac, Texcoco | | | | |
| | Medio | Tepetitlaotoc | | | | |
| | Alto | | | | | |
| | Muy alto | | | | | |
| XII Tlainepanitla | Muy Bajo | Atizapán de Zaragoza, Tlainepanitla de Baz | | | | |
| | Bajo | | | | | |
| | Medio | | | | | |
| | Alto | | | | | |
| | Muy alto | | | | | |
| XIII Toluca | Muy Bajo | | | | | |
| | Bajo | Toluca | | | | |
| | Medio | Zinacantepec | | | | |
| | Alto | | | | | |
| | Muy alto | Almoloya de Juárez | | | | |

| Región | Grado de Marginación | Porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior | | | | |
|---------------------|----------------------|--|---------------------------|-----------------------------|----------|--|
| | | 0 - 4.9% | 5 - 9.9% | 10 - 14.9% | 15 - 20% | |
| XIII Bis Metepec | Muy Bajo | Metepec | | | | |
| | Bajo | Texcalyacac, Almoloya del Río, San Antonio la Isla, Rayón, Mexicalzingo, Chapultepec | | | | |
| | Medio | Tenango del Valle, Calimaya | | | | |
| | Alto | | | | | |
| | Muy alto | | | | | |
| | Muy Bajo | Coacalco de Berriozábal, Cuautitlán | | | | |
| | Bajo | Melchor Ocampo, Teoloyucán, Tultepec, Tultitlán | | | | |
| XIV Tultitlán | Medio | | | | | |
| | Alto | | | | | |
| | Muy alto | | | | | |
| | Muy Bajo | | | | | |
| | Bajo | | | | | |
| | Medio | Valle de Bravo | | | | |
| | Alto | | Santo Tomás, Zaccazonapan | | | |
| XV Valle de Bravo | Muy alto | Villa Victoria, Donato Guerra, Villa de Allende, Amandico | | Ixtapan del Oro, Orizolapan | | |
| | | | | | | |

| Región | Grado de Marginación | Porcentaje de hogares con migrantes en Estados Unidos en el quinquenio anterior | | | | |
|--------------|----------------------|---|----------|------------|----------|--|
| | | 0 - 4.9% | 5 - 9.9% | 10 - 14.9% | 15 - 20% | |
| XVI Zumpango | Muy Bajo | | | | | |
| | Bajo | Nexitlapan, Apaxco, Tequixquiac, Zumpango, Jaltenco | | | | |
| | Medio | Hueyoxitla | | | | |
| | Alto | | | | | |
| | Muy alto | | | | | |

Fuente: Coordinación de Estudios y Proyecciones Especiales de la Secretaría de Desarrollo Social del Estado de México a partir de datos del Consejo Estatal de Población.

El modelo de Goodwin. Ciclos económicos e inversión en Bolivia

The Goodwin's model. Economic Cycles and Investment in Bolivia

*Javier Aliaga Lordemann**

*Raúl Rubín de Celis***

*Horacio Villegas Quino****

Resumen

Los ciclos económicos en Bolivia son estables en el largo plazo, pero no en el corto plazo; aun así, los ciclos-límite muestran que existe equilibrio. Tanto el acelerador como el tiempo de fabricación de nuevos bienes de capital dependen de las percepciones de las políticas del Gobierno. Si estas políticas permitieran que el tiempo de fabricación de nuevos bienes de capital se redujera o el impacto del acelerador fuera mayor, mejoraría el impacto de la inversión sobre el producto, teniendo como resultado ciclos estables tanto en el corto como en el largo plazo.

Abstract

The economic cycles in Bolivia are stable in the long term but not in the short term. Eventho the cycles-limit show that balance exists. The accelerator as the time of manufacture of new capital assets clearly depends on the perceptions of the policies of the government. If these policies allow that the time of manufacture of new capital assets is reduced or the impact

* Director del Instituto de Investigaciones Socio Económicas (IISEC-UCB). La Paz – Bolivia. jaliaga@ucb.edu.bo

** Investigador Asociado del Instituto de Investigaciones Socio Económicas (IISEC-UCB). La Paz – Bolivia. celis@ucb.edu.bo

*** Investigador del Instituto de Investigaciones Socio Económicas (IISEC-UCB). La Paz – Bolivia. hvillegas@ucb.edu.bo

of the accelerator was greater, would improve the impact of the investment on the product, having had as result stable cycles in the short term and length term.

Palabras clave: Ciclos económicos, inversión, equilibrio, estabilidad, corto plazo, largo plazo, acelerador, producto, no linealidad, economía dinámica, inestabilidad.

Keywords: Economic cycles, Investment, Balance, Stability, Short Term, Long Term, Accelerator, Product, non - linearity, Dinamic economy, Instability.

Clasificación / Classification JEL: C62, E22, E32

1. Introducción

El producto de una economía está determinado por diversos factores. Establecer cuáles son estos factores y su importancia relativa, ciertamente no es una tarea sencilla. El producto se mueve en ciclos, pero las causas, regularidad y magnitud pueden diferir mucho entre economías. Por ejemplo, los países fuertemente expuestos al comercio internacional muestran características muy distintas en las fluctuaciones del PIB, con respecto a los países menos dependientes del intercambio. En conclusión, se podría decir que no existe una explicación única de las fluctuaciones económicas.

Ackley (1970) menciona que en casi todas las teorías macroeconómicas se ha asignado una posición de crucial importancia a la inversión, y entre ellas figura la teoría de los ciclos económicos. El papel primordial que tiene la inversión probablemente refleja la gran inestabilidad de ésta.

La inversión en Bolivia en 1982 fue del 10 por ciento del PIB, mientras que el 2009 alcanzó el 17 por ciento del PIB. La inversión ha aumentado con creces desde que Evo Morales asumió el poder.

¿Cuál es la importancia de la inversión sobre el ciclo? Este documento examinará la causalidad de la inversión en los ciclos económicos. Se debe resaltar que la inversión es el componente más difícil de aproximar, dificultando su análisis. En consecuencia, el empleo de un modelo no lineal es mucho más beneficioso, permitiendo estudiar los ciclos en el corto y largo plazo.

La segunda parte explica los fundamentos del modelo de Goodwin y la tercera, el modelo forzado de Van der Pol. La cuarta sección presenta el modelo econométrico, la quinta los resultados y la sexta concluye el documento.

2. Modelo de ciclos económicos de Goodwin

El modelo de Goodwin no predice los ciclos económicos, muestra cómo los ciclos económicos futuros tienden a ajustarse o aproximarse a los ciclos que muestra el modelo; por lo tanto, refleja el equilibrio o desequilibrio de los ciclos económicos en el tiempo. Así como los modelos de crecimiento de Solow, Ramsey y otros muestran cómo sería el nivel de producto *per cápita* en el tiempo, no el producto *per cápita* para cada periodo; el modelo de Goodwin opera respecto de los ciclos económicos.

De acuerdo a Matsumoto (2007) existen varias aproximaciones al modelo de ciclos económicos, desde un modelo básico lineal hasta el modelo no lineal. Goodwin (1951) muestra una aproximación de los ciclos económicos a una forma no lineal.

De acuerdo a Matsumoto (2007), existen varias aproximaciones al modelo de los ciclos económicos, desde un modelo básico lineal hasta el modelo no lineal. Goodwin (1951) muestra una aproximación de los ciclos económicos a una forma no lineal.

Strotz, Mcanulty y Naines (1953) muestran que el modelo de Goodwin parte de los siguientes supuestos:

$$\begin{aligned} y(t) &= c(t) + \dot{k}(t) + l(t) \\ c(t) &= \alpha y(t) - \epsilon \dot{y}(t) + \beta \quad (1) \\ k(t) &= \varphi[\dot{y}(t - \theta)] \end{aligned}$$

Donde $y(t)$ es el ingreso, $c(t)$ es el consumo, α es la propensión marginal a consumir, β es el consumo autónomo, $\dot{k}(t)$ es la inversión inducida, $l(t)$ es la inversión autónoma, $\varphi[\dot{y}(t - \theta)]$ refleja las decisiones de inversión, ϵ es el tiempo que se tarda en producir nuevos bienes de consumo y θ es el tiempo que se tarda en la fabricación de bienes de capital. Los valores de ϵ y θ son expresados en años.

Goodwin reduce (1) a una ecuación oscilatoria:

$$\epsilon \theta \ddot{y} + (\epsilon + (1 - \alpha)\theta)\dot{y} - \varphi(\dot{y}) + (1 - a)y = 0^*(t) \quad (2)$$

La ecuación (2) no muestra aún una relación con los ciclos económicos. Goodwin supone que $0^*(t)$ no depende del tiempo y que puede aproximarse a una constante. A partir de ello, estudia las desviaciones de equilibrio del ingreso: $0^*(t)/(1 - a)$. Luego, los ciclos económicos pueden aproximarse como:

$$z(t) = y(t) - \frac{0^*}{1-a} \quad (3)$$

Reemplazando la ecuación (3) en la ecuación (2) se tiene:

$$\in \ddot{z} + (\in + (1-a)\theta)\dot{z} - \varphi(\dot{z}) + (1-a)z = 0 \quad (4)$$

La expresión (4) es una ecuación oscilatoria en función de los ciclos económicos.

3. Modelo forzado de Van der Pol

Chian (2007) muestra cómo se puede aproximar la ecuación (2). Luego, la ecuación (4) quedaría como:

$$\ddot{z} + \mu(z^2 - 1)\dot{z} + z = 0 \quad (5)$$

La ecuación (5) es conocida como la ecuación de Van der Pol. Determinar cómo estará compuesto μ es decisivo para el análisis del modelo de Goodwin.

En la ecuación oscilatoria de Goodwin expresada en la ecuación (4), Matsumoto y Suzuki (2006) demuestran la coexistencia de múltiples ciclos económicos a través de la bifurcación de Hopf.

En el caso de la ecuación de Van der Pol expresada en (5), la bifurcación de Hopf está determinada por el parámetro μ . Matsumoto y Suzuki (2006) muestran que la expresión $v - [\in + (1-a)\theta]$ determina la estabilidad del modelo (el equivalente a μ).

Reemplazando esta expresión en (5) se tiene:

$$\ddot{z} + [v - \in - (1-a)\theta](z^2 - 1)\dot{z} + z = 0 \quad (6)$$

Donde $v = \frac{d\varphi(0)}{dz}$ mide los cambios de las decisiones de inversión frente a variaciones en los ciclos económicos. También se lo interpreta como el acelerador no lineal.

4. Modelo econométrico

La dificultad de estimar el modelo de Goodwin la constituyen los parámetros α , β , \in y θ . Goodwin no cuantificó estos parámetros, sino simplemente se basó en estudios previos sobre sus valores.

Una aproximación econométrica de los parámetros α , β , ϵ y θ se puede obtener a partir de la ecuación (2). Considerando un modelo de economía abierta y expresando la ecuación en términos discretos se tendría:

$$y(t) = \frac{1}{(\epsilon+1-\alpha)(1+\theta)} O^*(t) + \frac{1}{(\epsilon+1-\alpha)(1+\theta)} \varphi(\Delta y) + \frac{2\epsilon\theta + \epsilon + (1-\alpha)\theta}{(\epsilon+1-\alpha)(1+\theta)} y(t-1) - \frac{\epsilon\theta}{(\epsilon+1-\alpha)(1+\theta)} y(t-2) + \epsilon_t \quad (7)$$

Donde $O^*(t) = \beta + l(t) + g(t) + x(t) - m(t)$, $g(t)$ es el gasto del Gobierno, $x(t)$ son la exportaciones y $m(t)$ son las importaciones. Esta ecuación muestra un modelo dinámico con rezagos distribuidos. Reexpresando (7) se tiene:

$$y(t) = \beta_0 + \beta_1 \varphi(\Delta y) + \beta_2 y(t-1) - \beta_3 y(t-2) + \epsilon_t \quad (8)$$

El modelo descrito anteriormente es un ARDL (2,0). Debido a la presencia de raíz unitaria en las series, el modelo de corrección de errores asociado es:

$$\Delta y(t) = \beta_0 + \beta_1 \varphi(\Delta y) + \beta_2 \Delta y(t-1) + (\beta_2 + \beta_3) y(t-2) - y(t-1) + \epsilon_t \quad (9)$$

Sin embargo, no es correcto estimar como constante a β_0 , luego:

$$\Delta y(t) = \beta_1 0(t) + \beta_1 \varphi(\Delta y) + \beta_2 \Delta y(t-1) + (\beta_2 + \beta_3) y(t-2) - y(t-1) + \epsilon_t \quad (10)$$

Es necesario resaltar que se está buscando una relación de largo plazo, por lo que se tiene $0(t) + \varphi(\Delta y) \cong fbk(t) + g(t) + x(t) - m(t)$, donde $fbk(t)$ es la formación bruta de capital fijo.

Si bien Goodwin define los ciclos económicos a través de la expresión (3), existen metodologías alternativas; por ejemplo el filtro Hodrick–Prescott. Costain (2005) muestra cómo se calcula el componente cíclico del producto. Para ello transforma la serie del producto en logaritmos:

$$y(t) = \log Y(t) \quad (11)$$

El producto está compuesto por su tendencia y su desviación:

$$y(t) = \tau(t) + \delta(t) \quad (12)$$

donde $\tau(t)$ es la tendencia obtenida a través del filtro Hodrick–Prescott y $\delta(t)$ son los ciclos económicos.

La expresión (12) es análoga a la expresión (3) del modelo de ciclos económicos de Goodwin.

$$\text{Donde: } z(t) = \delta(t) \text{ y } \tau(t) = \frac{0^*}{1 - \alpha}$$

5. Resultados

El estudio abarca el periodo comprendido entre 1980 y 2009. Se emplearon mínimos cuadrados no lineales en la estimación de todos los parámetros, con el fin de estimar un modelo de corrección de errores y poder restringir los parámetros de acuerdo a la teoría económica, sin la necesidad de usar un test de Wald para cada coeficiente.

5.1. Parámetros α , \in , y θ

La expresión (10) nos permite aproximar algunos de los parámetros necesarios para estudiar el Modelo de Goodwin. El Cuadro 1 muestra los resultados de la estimación.

Cuadro 1
Parámetros del modelo de Goodwin en su forma reducida

| | |
|----------------|-------|
| β_1 | 0.16 |
| β_2 | 1.54 |
| β_3 | -0.57 |
| R^2 | 0.63 |
| R^2 ajustado | 0.61 |

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros β_1 , β_2 y β_3 no permiten una interpretación directa, por lo que se hace necesario obtener los parámetros estructurales a partir de las expresiones (7) y (10), tal como se observa en el Cuadro 2.

Cuadro 2
Parámetros del modelo de Goodwin en su forma estructural

| | |
|----------|-------|
| α | 0.82 |
| \in | 0.28 |
| θ | 13.06 |

Fuente: Elaboración propia

Los resultados indican que en Bolivia la propensión marginal a consumir es 0.82. A su vez, el tiempo que se tarda en producir nuevos bienes de consumo en la economía es menor a uno, cercano a 0.25, lo que significa que se tarda aproximadamente un trimestre en producirlos. Por otro lado, el tiempo que se destina a la fabricación de nuevos bienes de capital es muy alto, más de 13 años.

5.2. Acelerador no lineal

Los ciclos se obtuvieron a través del filtro Hodrick–Prescott, para lo cual se seleccionó el parámetro lambda, igual a 6.65. Según Maravall y del Río (2001), se debe usar un lambda entre 6 y 14 para datos anualizados. (ver Cuadro 3).

Cuadro 3
Acelerador no lineal del modelo de Goodwin

| | |
|-------------------------|------|
| v | 4.33 |
| R ² | 0.77 |
| R ² ajustado | 0.77 |

Fuente: Elaboración propia

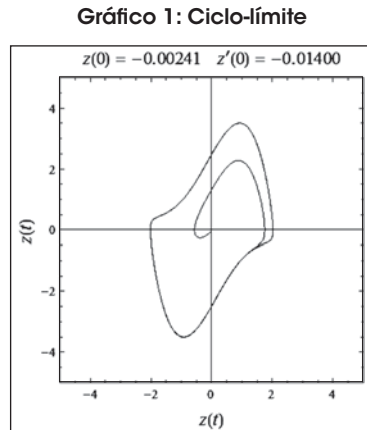
El acelerador no lineal podría ser interpretado como una variación en años de las decisiones de inversión frente a una variación en el cambio en los ciclos del producto. El valor del acelerador es de 4 años y un trimestre, aproximadamente.

Poder saber la incidencia del acelerador no solo depende de su valor característico, sino de su interacción con α , ϵ y θ . De acuerdo a los criterios que se señalaron sobre la coexistencia de múltiples ciclos económicos, se puede determinar que la incidencia del acelerador es mayor que la producción de nuevos bienes de consumo y capital; dando como consecuencia la presencia de ciclos económicos.

5.3. Ciclos-límite y ciclos económicos

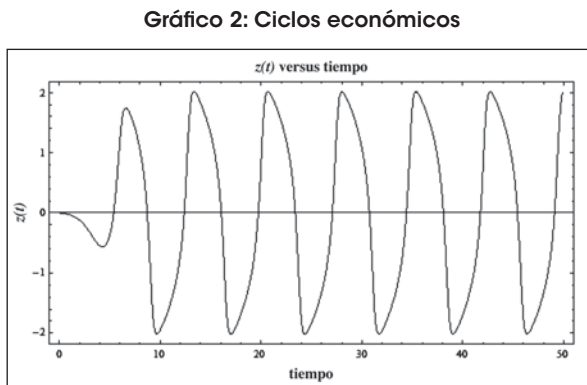
Una manera de observar la estabilidad de los ciclos económicos es a través del ciclo-límite. Un ciclo-límite es un diagrama en dos dimensiones que muestra trayectorias; si la trayectoria es cerrada sin desviaciones, los ciclos económicos son estables; si presenta desviaciones con respecto a su trayectoria cerrada, los ciclos económicos son inestables; si presenta múltiples trayectorias y desviaciones, los ciclos económicos son caóticos.

Se graficó el ciclo-límite para Bolivia a partir de la ecuación (6). Las condiciones iniciales que se establecieron se tomaron a partir los ciclos obtenidos por el filtro Hodrick–Prescott. Los valores de $z(0)$ corresponden al año 2009 y $z'(0)$ es la diferencia entre los años 2009 y 2008 (ver Gráfico 1).



Fuente: Elaboración propia

También se procedió a graficar los ciclos económicos, bajo las condiciones iniciales anteriormente descritas (ver Gráfico 2)

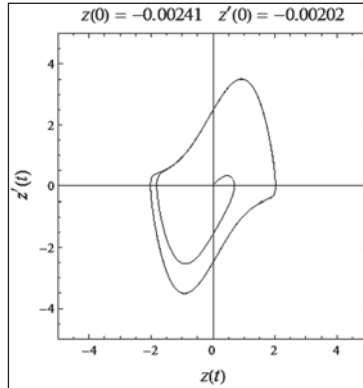


Fuente: Elaboración propia

La expresión (6) es una ecuación no lineal, por tanto las condiciones iniciales de $z'(0)$ podrían estar sobredimensionadas. En otras palabras, se trata de un modelo continuo, y una

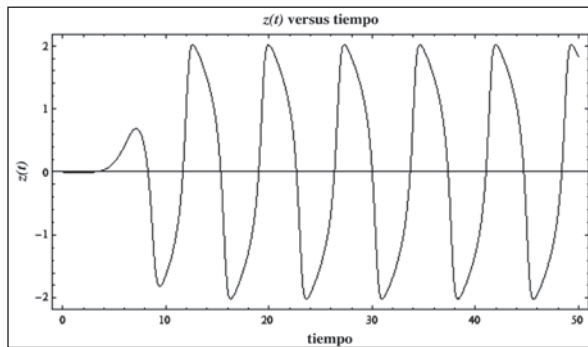
diferencia entre años es demasiado amplia; entonces es necesario volver a ilustrar el ciclo límite y los ciclos económicos, ahora reduciendo el valor de $z'(0)$ (ver Gráficos 3 y 4)

Gráfico 3: Ciclo-límite con variación menor de $z'(0)$



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4: Ciclos económicos con variación menor de $z'(0)$



Fuente: Elaboración propia

Las dos situaciones ilustradas anteriormente muestran ciclos-límite estables. Inicialmente, ambos casos presentan ligeras desviaciones que posteriormente desaparecen. Se puede observar esto claramente en los ciclos económicos, especialmente en los ciclos iniciales, que no se comportan de la misma forma que los ciclos posteriores.

6. Conclusiones

Las implicaciones del modelo de Goodwin forzado a una ecuación de Van der Pol son altamente significativas. Muestran que los ciclos económicos son estables en el largo plazo y no así en el corto plazo; aun así, los ciclos-límite muestran que existe equilibrio.

La estabilidad está explicada básicamente por el acelerador. El acelerador, al ser mayor que el tiempo que se destina a producir nuevos bienes de consumo y nuevos bienes de capital corregido por la propensión a ahorrar, explicaría la presencia de ciclos estables en el largo plazo; pero debido a las condiciones iniciales, se tiene una variación en el corto plazo.

El consumo en la economía boliviana es alto; la propensión marginal a consumir es cercana a 0.85, reduciendo el impacto del acelerador debido a que la propensión a ahorrar estaría cerca a 0.25. Por otra parte, el tiempo que se tarda en producir nuevos bienes de consumo es un trimestre. Ambos hechos reflejan una economía que desincentiva a las inversiones en la fabricación de nuevos bienes de capital.

La capacidad de fabricar bienes de capital en Bolivia es baja, puesto que se tarda mucho tiempo en crear estos nuevos bienes. Por lo tanto, en Bolivia la brecha entre el tiempo de producir nuevos bienes de consumo y nuevos bienes de capital es amplia.

Estas consideraciones muestran que actualmente en Bolivia la producción de nuevos bienes de capital tomaría un poco más de trece años; esto podría ser el resultado de la percepción de los inversores y la población boliviana sobre invertir en el país.

Tanto el acelerador como el tiempo de fabricación de nuevos bienes de capital dependen de las percepciones de las políticas del Gobierno. Si éstas permitieran que el tiempo de fabricación de nuevos bienes de capital se redujera o el impacto del acelerador fuera mayor, mejoraría el impacto de la inversión sobre el producto, teniendo ciclos estables tanto en el corto como en el largo plazo.

Artículo recibido en agosto de 2010

Manejado por: ABCE

Aceptado en marzo de 2011

Referencias

1. Ackley, Gardner (1970). Teoría macroeconómica. The Macmillan Company (1º edición). Unión Tipográfica. Editorial hispano-americana.
2. Chian, Abraham C.-L. (2007). Complex Systems Approach to Economic Dynamics. Berlin: Springer-Verlag.
3. Costain, James (2005). "Apuntes sobre el PIB y hechos estilizados". Universidad Carlos III de Madrid.
4. Hodrick, Robert y Edward C. Prescott (1997). "*Postwar U.S. Business Cycles: An Empirical Investigation*". *Journal of Money, Credit, and Banking*.
5. Goodwin, R. M. (1951). "*The Nonlinear Accelerator and the Persistence of Business Cycles*". *Econometrica*, (19), 1-17.
6. Maravall, Agustín, y Ana del Río. 2001. "Time Aggregation and the Hodrick-Prescott Filter". Banco de España.
7. Matsumoto, Akio, y Suzuki, Mami (2006). "*Coexistence of Multiple Business Cycles in Goodwin's 1951 Model*". *The Institute of Economic Research. Chuo University*.
8. Matsumoto, Akio (2007). "*Note on Goodwin's 1951 Nonlinear Accelerator Model with an Investment Lag*". *The Institute of Economic Research. Chuo University*.
9. Strotz, R.H., J.C. McNulty y J.B. Nornal Jr. (1953). "Analysis of types of oscilations in Goodwin's Model of Business Cycles". *Econometrica*, (21), 330 - 411.

Anexo 1: PIB en Bs. de 1990 por el lado del gasto

| Año | C | G | FBK | VE | X | M | Y |
|------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| 1980 | 10804472085,50 | 2353886166,22 | 1963222457,31 | -45476438,79 | 2888765388,41 | 2703641315,64 | 15261228343,00 |
| 1981 | 10849053041,03 | 2551141826,94 | 1922221076,99 | -19461031,53 | 2926118049,45 | 2925782175,52 | 15303290787,35 |
| 1982 | 10414387224,81 | 2476903599,78 | 1395659421,27 | 59743156,16 | 2542159111,24 | 2188318244,33 | 14700534268,94 |
| 1983 | 9937017611,39 | 2185867426,81 | 1222858129,62 | 70418383,99 | 2590569845,40 | 1900410569,85 | 14106320827,35 |
| 1984 | 9934988853,68 | 2269148975,77 | 1313044313,06 | 488416486,86 | 2433438756,19 | 2361023105,40 | 14078014280,15 |
| 1985 | 10330239657,73 | 2101231951,56 | 1499459393,06 | 785208511,02 | 1977362408,30 | 2851490034,30 | 13842011887,35 |
| 1986 | 10844192384,73 | 1804538000,00 | 1560451720,82 | 27395939,22 | 2355680932,83 | 3106524447,21 | 13485734530,38 |
| 1987 | 11181302419,68 | 1735759000,00 | 1644120395,39 | 221846150,43 | 2381708125,40 | 3346782565,06 | 13817953525,84 |
| 1988 | 11280821243,86 | 1801118000,00 | 1742299509,97 | 195149647,14 | 2541494686,65 | 3340896485,76 | 14219986601,86 |
| 1989 | 11482159472,76 | 1816974000,00 | 1706846387,00 | -62339863,12 | 3166948934,45 | 3351646214,02 | 14758942717,07 |
| 1990 | 11869886151,98 | 1815415000,00 | 1939424555,60 | -4100535,63 | 3517480312,12 | 3694969556,04 | 15443135928,03 |
| 1991 | 12264367594,82 | 1876065000,00 | 2309227550,00 | 192895314,64 | 3774038251,18 | 4160140935,32 | 16256452775,32 |
| 1992 | 12700433425,95 | 1945335000,00 | 2587870423,43 | 47433705,40 | 3816036039,01 | 4572993591,57 | 16524115002,22 |
| 1993 | 13122712290,37 | 1994606000,00 | 2655894506,00 | -22412085,82 | 4018461402,73 | 4539683683,88 | 17229578429,41 |
| 1994 | 13507684028,89 | 2057084000,00 | 2442940908,98 | -88668724,48 | 4625108480,44 | 4510420144,83 | 18033728549,01 |
| 1995 | 13905760375,51 | 2193477000,00 | 2780084100,65 | -136030388,41 | 5046839254,42 | 4912734180,79 | 18877396161,37 |
| 1996 | 14359906000,00 | 2250628000,00 | 3106141000,00 | 34669000,00 | 5252178000,00 | 5302818000,00 | 19700704000,00 |
| 1997 | 15139505009,37 | 2326252000,00 | 3937438500,15 | 152949103,40 | 5141345603,39 | 6020772217,96 | 20676717998,36 |
| 1998 | 15934817048,92 | 2414668110,93 | 5087830235,92 | 168730375,01 | 5474629737,93 | 7364052028,80 | 21716623479,92 |
| 1999 | 16375000609,15 | 2492184272,14 | 4310603475,80 | -40284582,37 | 4773614518,57 | 6101789723,82 | 21809328569,48 |
| 2000 | 16752141623,64 | 2543985000,00 | 3927006283,64 | 28275103,27 | 5491595341,52 | 6386738253,13 | 22356265098,94 |
| 2001 | 16964766581,65 | 2616812380,00 | 3084701084,58 | 179626798,69 | 5951638739,58 | 6064845593,46 | 22732699991,04 |
| 2002 | 17311639084,89 | 2707278000,00 | 3655612298,64 | 191764922,88 | 6290479782,22 | 6859037709,10 | 23297736379,52 |
| 2003 | 17637776001,33 | 2804003270,00 | 3259138279,18 | 94704738,61 | 7055594224,28 | 6921799583,74 | 23929416929,65 |
| 2004 | 18151034792,92 | 2892281222,37 | 3222710280,78 | -266128069,10 | 8228272478,08 | 7300108516,57 | 24928062188,49 |
| 2005 | 18755349215,33 | 2989343626,27 | 3437558629,65 | 313326723,26 | 8914207156,10 | 8379545559,39 | 26030239791,22 |
| 2006 | 19518920682,58 | 3087197000,00 | 3757082440,79 | -197120013,59 | 9924795979,47 | 8811963416,70 | 27278912672,55 |
| 2007 | 20332797121,88 | 3203527000,00 | 4232114476,15 | -278545514,38 | 10231389604,66 | 9197255565,42 | 28524027122,89 |
| 2008 | 21447626610,53 | 3328816987,01 | 5022364925,87 | 90127111,15 | 10453874677,08 | 10064984005,83 | 30277826305,81 |
| 2009 | 22235429361,92 | 3455978965,66 | 5167461202,77 | 143331824,85 | 9329491578,62 | 9037440171,52 | 31294252762,30 |

Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE)

Anexo 2: Prueba de raíz unitaria de la serie del producto

Null Hypothesis: Y has a unit root

Exogenous: Constant

Lag Length: 0 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | t-Statistic | Prob.* |
|--|-------------|--------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | 5.003680 | 1.0000 |
| Test critical values: | | |
| 1% level | -3.679322 | |
| 5% level | -2.967767 | |
| 10% level | -2.622989 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values. (falta biblio)

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(Y)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1981-2009

Included observations: 29 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|----------|
| Y(-1) | 0.078251 | 0.015639 | 5.003680 | 0.0000 |
| C | -9.56E+08 | 3.11E+08 | -3.071541 | 0.0048 |
| R-squared | 0.481137 | Mean dependent var | | 5.53E+08 |
| Adjusted R-squared | 0.461919 | S.D. dependent var | | 5.66E+08 |
| S.E. of regression | 4.15E+08 | Akaike info criterion | | 42.59253 |
| Sum squared resid | 4.65E+18 | Schwarz criterion | | 42.68683 |
| Log likelihood | -615.5917 | Hannan-Quinn criter. | | 42.62206 |
| F-statistic | 25.03681 | Durbin-Watson stat | | 0.931620 |
| Prob(F-statistic) | 0.000030 | | | |

Null Hypothesis: D(Y) has a unit root

Exogenous: Constant

Lag Length: 0 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | t-Statistic | Prob. * |
|--|-------------|---------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | -1.848118 | 0.3507 |
| Test critical values: | | |
| 1% level | -3.689194 | |
| 5% level | -2.971853 | |
| 10% level | -2.625121 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(Y,2)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1982 2009

Included observations: 28 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|----------|
| D(Y(-1)) | -0.229469 | 0.124163 | -1.848118 | 0.0760 |
| C | 1.58E+08 | 96171953 | 1.641480 | 0.1127 |
| R-squared | 0.116113 | Mean dependent var | | 34798715 |
| Adjusted R-squared | 0.082118 | S.D. dependent var | | 3.83E+08 |
| S.E. of regression | 3.67E+08 | Akaike info criterion | | 42.34931 |
| Sum squared resid | 3.51E+18 | Schwarz criterion | | 42.44447 |
| Log likelihood | -590.8904 | Hannan-Quinn criter. | | 42.37840 |
| F-statistic | 3.415540 | Durbin-Watson stat | | 2.145812 |
| Prob(F-statistic) | 0.075991 | | | |

Null Hypothesis: D(Y,2) has a unit root

Exogenous: Constant

Lag Length: 0 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | t-Statistic | Prob.* |
|--|-------------|--------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | -7.422708 | 0.0000 |
| Test critical values: | | |
| 1% level | -3.699871 | |
| 5% level | -2.976263 | |
| 10% level | -2.627420 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(Y,3)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1983 2009

Included observations: 27 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------|
| D(Y(-1),2) | -1.396262 | 0.188107 | -7.422708 | 0.0000 |
| C | 85091839 | 67297919 | 1.264405 | 0.2177 |
| R-squared | 0.687877 | Mean dependent var | | -3427917. |
| Adjusted R-squared | 0.675392 | S.D. dependent var | | 6.04E+08 |
| S.E. of regression | 3.44E+08 | Akaike info criterion | | 42.22228 |
| Sum squared resid | 2.96E+18 | Schwarz criterion | | 42.31826 |
| Log likelihood | -568.0007 | Hannan-Quinn criter. | | 42.25082 |
| F-statistic | 55.09660 | Durbin-Watson stat | | 2.165549 |
| Prob(F-statistic) | 0.000000 | | | |

Anexo 3: Prueba de raíz unitaria de la serie del gasto

Null Hypothesis: G has a unit root

Exogenous: Constant

Lag Length: 3 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | | t-Statistic | Prob. * |
|--|-----------|-------------|---------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | | -0.607836 | 0.8524 |
| Test critical values: | 1% level | -3.711457 | |
| | 5% level | -2.981038 | |
| | 10% level | -2.629906 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(G)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1984 2009

Included observations: 26 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|----------|
| G(-1) | -0.022669 | 0.037295 | -0.607836 | 0.5498 |
| D(G(-1)) | 0.358861 | 0.141663 | 2.533192 | 0.0193 |
| D(G(-2)) | 0.001767 | 0.144691 | 0.012209 | 0.9904 |
| D(G(-3)) | 0.523970 | 0.132715 | 3.948098 | 0.0007 |
| C | 75676252 | 84997453 | 0.890336 | 0.3834 |
| R-squared | 0.578698 | Mean dependent var | | 48850444 |
| Adjusted R-squared | 0.498451 | S.D. dependent var | | 94722544 |
| S.E. of regression | 67082651 | Akaike info criterion | | 39.05179 |
| Sum squared resid | 9.45E+16 | Schwarz criterion | | 39.29373 |
| Log likelihood | -502.6733 | Hannan-Quinn criter. | | 39.12146 |
| F-statistic | 7.211384 | Durbin-Watson stat | | 1.443187 |
| Prob(F-statistic) | 0.000809 | | | |

Null Hypothesis: D(G) has a unit root

Exogenous: Constant

Log Length: 2 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | t-Statistic | Prob.* |
|--|-------------|--------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | -1.269911 | 0.6277 |
| Test critical values: | | |
| 1% level | -3.711457 | |
| 5% level | -2.981038 | |
| 10% level | -2.629906 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(G,2)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1984 2009

Included observations: 26 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|----------|
| D(G(-1)) | -0.199436 | 0.157048 | -1.269911 | 0.2174 |
| D(G(-1),2) | -0.472928 | 0.148066 | -3.194035 | 0.0042 |
| D(G(-2),2) | -0.492258 | 0.120268 | -4.093010 | 0.0005 |
| C | 24716416 | 13788155 | 1.792583 | 0.0868 |
| R-squared | 0.684372 | Mean dependent var | | 16084544 |
| Adjusted R-squared | 0.641332 | S.D. dependent var | | 1.10E+08 |
| S.E. of regression | 66114344 | Akaike info criterion | | 38.99231 |
| Sum squared resid | 9.62E+16 | Schwarz criterion | | 39.18586 |
| Log likelihood | -502.9000 | Hannan-Quinn criter. | | 39.04804 |
| F-statistic | 15.90080 | Durbin-Watson stat | | 1.411789 |
| Prob(F-statistic) | 0.000010 | | | |

Null Hypothesis: D(G,2) has a unit root
 Exogenous: Constant
 Lag Length: 1 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | t-Statistic | Prob. * |
|--|-------------|---------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | -12.43129 | 0.0000 |
| Test critical values: | | |
| 1% level | -3.711457 | |
| 5% level | -2.981038 | |
| 10% level | -2.629906 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation
 Dependent Variable: D(G,3)
 Method: Least Squares
 Sample (adjusted): 1984 2009
 Included observations: 26 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|----------|
| D(G(-1),2) | -2.162474 | 0.173954 | -12.43129 | 0.0000 |
| D(G(-1),3) | 0.569639 | 0.105061 | 5.422010 | 0.0000 |
| C | 18861038 | 13166286 | 1.432525 | 0.1654 |
| R-squared | 0.894314 | Mean dependent var | | 8410382. |
| Adjusted R-squared | 0.885124 | S.D. dependent var | | 1.98E+08 |
| S.E. of regression | 66989131 | Akaike info criterion | | 38.98613 |
| Sum squared resid | 1.03E+17 | Schwarz criterion | | 39.13129 |
| Log likelihood | -503.8196 | Hannan-Quinn criter. | | 39.02793 |
| F-statistic | 97.31309 | Durbin-Watson stat | | 1.427279 |
| Prob(F-statistic) | 0.000000 | | | |

Anexo 4: Prueba de raíz unitaria de la serie de la inversión

Null Hypothesis: FBK has a unit root

Exogenous: Constant

Lag Length: 0 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | t-Statistic | Prob.* |
|--|-------------|--------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | -0.162559 | 0.9328 |
| Test critical values: | | |
| 1% level | -3.679322 | |
| 5% level | -2.967767 | |
| 10% level | -2.622989 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(FBK)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1981 2009

Included observations: 29 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|----------|
| FBK(-1) | -0.012284 | 0.075568 | -0.162559 | 0.8721 |
| C | 1.45E+08 | 2.27E+08 | 0.638719 | 0.5284 |
| R-squared | 0.000978 | Mean dependent var | | 1.10E+08 |
| Adjusted R-squared | -0.036023 | S.D. dependent var | | 4.45E+08 |
| S.E. of regression | 4.53E+08 | Akaike info criterion | | 42.76548 |
| Sum squared resid | 5.53E+18 | Schwarz criterion | | 42.85978 |
| Log likelihood | -618.0995 | Hannan-Quinn criter. | | 42.79501 |
| F-statistic | 0.026425 | Durbin-Watson stat | | 1.627535 |
| Prob(F-statistic) | 0.872076 | | | |

Null Hypothesis: D(FBK) has a unit root

Exogenous: Constant

Lag Length: 0 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | t-Statistic | Prob.* |
|--|-------------|--------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | -4.282010 | 0.0024 |
| Test critical values: | | |
| 1% level | -3.689194 | |
| 5% level | -2.971853 | |
| 10% level | -2.625121 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(FBK,2)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1982 2009

Included observations: 28 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|----------|
| D(FBK(-1)) | -0.825088 | 0.192687 | -4.282010 | 0.0002 |
| C | 96791390 | 88223537 | 1.097115 | 0.2826 |
| R-squared | 0.413564 | Mean dependent var | | 6646345. |
| Adjusted R-squared | 0.391009 | S.D. dependent var | | 5.81E+08 |
| S.E. of regression | 4.53E+08 | Akaike info criterion | | 42.77097 |
| Sum squared resid | 5.34E+18 | Schwarz criterion | | 42.86613 |
| Log likelihood | -596.7936 | Hannan-Quinn criter. | | 42.80006 |
| F-statistic | 18.33561 | Durbin-Watson stat | | 1.969548 |
| Prob(F-statistic) | 0.000223 | | | |

Anexo 5: Prueba de raíz unitaria de la serie de las exportaciones

Null Hypothesis: X has a unit root

Exogenous: Constant

Lag Length: 0 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | t-Statistic | Prob.* |
|--|-------------|--------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | 0.508634 | 0.9841 |
| Test critical values: | | |
| 1% level | -3.679322 | |
| 5% level | -2.967767 | |
| 10% level | -2.622989 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(X)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1981 2009

Included observations: 29 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|----------|
| X(-1) | 0.018713 | 0.036790 | 0.508634 | 0.6151 |
| C | 1.29E+08 | 2.04E+08 | 0.633350 | 0.5318 |
| R-squared | 0.009491 | Mean dependent var | | 2.22E+08 |
| Adjusted R-squared | -0.027195 | S.D. dependent var | | 4.87E+08 |
| S.E. of regression | 4.94E+08 | Akaike info criterion | | 42.94016 |
| Sum squared resid | 6.59E+18 | Schwarz criterion | | 43.03446 |
| Log likelihood | -620.6324 | Hannan-Quinn criter. | | 42.96970 |
| F-statistic | 0.258709 | Durbin-Watson stat | | 1.298997 |
| Prob(F-statistic) | 0.615140 | | | |

Null Hypothesis: D(X) has a unit root

Exogenous: Constant

Lag Length: 0 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | t-Statistic | Prob.* |
|--|-------------|--------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | -3.075696 | 0.0401 |
| Test critical values: | | |
| 1% level | -3.689194 | |
| 5% level | -2.971853 | |
| 10% level | -2.625121 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(X,2)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1982 2009

Included observations: 28 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------|
| D(X(-1)) | -0.684101 | 0.222421 | -3.075696 | 0.0049 |
| C | 1.43E+08 | 1.10E+08 | 1.306155 | 0.2029 |
| R-squared | 0.266778 | Mean dependent var | | -41490563 |
| Adjusted R-squared | 0.238577 | S.D. dependent var | | 5.57E+08 |
| S.E. of regression | 4.86E+08 | Akaike info criterion | | 42.90967 |
| Sum squared resid | 6.14E+18 | Schwarz criterion | | 43.00482 |
| Log likelihood | -598.7353 | Hannan-Quinn criter. | | 42.93876 |
| F-statistic | 9.459908 | Durbin-Watson stat | | 1.805078 |
| Prob(F-statistic) | 0.004894 | | | |

Anexo 6: Prueba de raíz unitaria de la serie de las importaciones

Null Hypothesis: M has a unit root

Exogenous: Constant

Lag Length: 0 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | t-Statistic | Prob.* |
|--|-------------|--------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | -0.078332 | 0.9429 |
| Test critical values: | | |
| 1% level | -3.679322 | |
| 5% level | -2.967767 | |
| 10% level | -2.622989 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(M)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1981 2009

Included observations: 29 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|----------|
| M(-1) | -0.003722 | 0.047516 | -0.078332 | 0.9381 |
| C | 2.38E+08 | 2.67E+08 | 0.890755 | 0.3809 |
| R-squared | 0.000227 | Mean dependent var | | 2.18E+08 |
| Adjusted R-squared | -0.036801 | S.D. dependent var | | 5.63E+08 |
| S.E. of regression | 5.73E+08 | Akaike info criterion | | 43.23797 |
| Sum squared resid | 8.87E+18 | Schwarz criterion | | 43.33227 |
| Log likelihood | -624.9506 | Hannan-Quinn criter. | | 43.26750 |
| F-statistic | 0.006136 | Durbin-Watson stat | | 2.131868 |
| Prob(F-statistic) | 0.938142 | | | |

Null Hypothesis: D(M) has a unit root

Exogenous: Constant

Lag Length: 0 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | t-Statistic | Prob. * |
|--|-------------|---------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | -5.582747 | 0.0001 |
| Test critical values: | | |
| 1% level | -3.689194 | |
| 5% level | -2.971853 | |
| 10% level | -2.625121 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(M,2)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1982 2009

Included observations: 28 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------|
| D(M(-1)) | -1.191620 | 0.213447 | -5.582747 | 0.0000 |
| C | 2.69E+08 | 1.22E+08 | 2.195547 | 0.0372 |
| R-squared | 0.545193 | Mean dependent var | | -44631596 |
| Adjusted R-squared | 0.527700 | S.D. dependent var | | 8.37E+08 |
| S.E. of regression | 5.75E+08 | Akaike info criterion | | 43.24769 |
| Sum squared resid | 8.61E+18 | Schwarz criterion | | 43.34285 |
| Log likelihood | -603.4676 | Hannan-Quinn criter. | | 43.27678 |
| F-statistic | 31.16706 | Durbin-Watson stat | | 1.750658 |
| Prob(F-statistic) | 0.000007 | | | |

Anexo 7: Prueba de raíz unitaria de los ciclos de producto

Null Hypothesis: Z has a unit root

Exogenous: Constant

Lag Length: 0 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | t-Statistic | Prob. * |
|--|-------------|---------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | -4.181160 | 0.0029 |
| Test critical values: | | |
| 1% level | -3.679322 | |
| 5% level | -2.967767 | |
| 10% level | -2.622989 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(Z)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1981 2009

Included observations: 29 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------|
| Z(-1) | -0.781871 | 0.186999 | -4.181160 | 0.0003 |
| C | 0.000168 | 0.001874 | 0.089580 | 0.9293 |
| R-squared | 0.393014 | Mean dependent var | | 0.000103 |
| Adjusted R-squared | 0.370533 | S.D. dependent var | | 0.012717 |
| S.E. of regression | 0.010089 | Akaike info criterion | | -6.288195 |
| Sum squared resid | 0.002748 | Schwarz criterion | | -6.193899 |
| Log likelihood | 93.17883 | Hannan-Quinn criter. | | -6.258663 |
| F-statistic | 17.48210 | Durbin-Watson stat | | 1.634937 |
| Prob(F-statistic) | 0.000274 | | | |

Anexo 8: Prueba de raíz unitaria del componente no lineal de la tendencia del producto

Null Hypothesis: CICLOS has a unit root

Exogenous: Constant

Lag Length: 3 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | t-Statistic | Prob. * |
|--|-------------|---------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | -0.581655 | 0.8584 |
| Test critical values: | | |
| 1% level | -3.711457 | |
| 5% level | -2.981038 | |
| 10% level | -2.629906 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(CICLOS)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1984-2009

Included observations: 26 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------|
| CICLOS(-1) | -0.003214 | 0.005525 | -0.581655 | 0.5670 |
| D(CICLOS(-1)) | 2.350422 | 0.142265 | 16.52141 | 0.0000 |
| D(CICLOS(-2)) | -2.002550 | 0.255836 | -7.827465 | 0.0000 |
| D(CICLOS(-3)) | 0.611149 | 0.129253 | 4.728332 | 0.0001 |
| C | 0.000373 | 0.000224 | 1.666331 | 0.1105 |
| R-squared | 0.997462 | Mean dependent var | | 0.001399 |
| Adjusted R-squared | 0.996979 | S.D. dependent var | | 0.017674 |
| S.E. of regression | 0.000971 | Akaike info criterion | | -10.86457 |
| Sum squared resid | 1.98E-05 | Schwarz criterion | | -10.62262 |
| Log likelihood | 146.2394 | Hannan-Quinn criter. | | -10.79490 |
| F-statistic | 2063.614 | Durbin-Watson stat | | 1.747711 |
| Prob(F-statistic) | 0.000000 | | | |

Null Hypothesis: D(CICLOS) has a unit root

Exogenous: Constant

Lag Length: 3 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | t-Statistic | Prob.* |
|--|-------------|--------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | -2.628832 | 0.1007 |
| Test critical values: | | |
| 1% level | -3.724070 | |
| 5% level | -2.986225 | |
| 10% level | -2.632604 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(CICLOS,2)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1985 2009

Included observations: 25 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------|
| D(CICLOS(-1)) | -0.043821 | 0.016670 | -2.628832 | 0.0161 |
| D(CICLOS(-1),2) | 1.524652 | 0.210001 | 7.260196 | 0.0000 |
| D(CICLOS(-2),2) | -0.867144 | 0.331545 | -2.615463 | 0.0166 |
| D(CICLOS(-3),2) | 0.167084 | 0.179402 | 0.931340 | 0.3628 |
| C | 0.000348 | 0.000244 | 1.423820 | 0.1699 |
| R-squared | 0.967197 | Mean dependent var | | 0.002619 |
| Adjusted R-squared | 0.960637 | S.D. dependent var | | 0.004944 |
| S.E. of regression | 0.000981 | Akaike info criterion | | -10.83924 |
| Sum squared resid | 1.92E-05 | Schwarz criterion | | -10.59546 |
| Log likelihood | 140.4905 | Hannan-Quinn criter. | | -10.77163 |
| F-statistic | 147.4266 | Durbin-Watson stat | | 1.907155 |
| Prob(F-statistic) | 0.000000 | | | |

Null Hypothesis: D(CICLOS,2) has a unit root

Exogenous: Constant

Lag Length: 1 (Automatic based on SIC, MAXLAG=7)

| | t-Statistic | Prob.* |
|--|-------------|--------|
| Augmented Dickey-Fuller test statistic | -3.511964 | 0.0158 |
| Test critical values: | | |
| 1% level | -3.711457 | |
| 5% level | -2.981038 | |
| 10% level | -2.629906 | |

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(CICLOS,3)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1984 2009

Included observations: 26 after adjustments

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------|
| D(CICLOS(-1),2) | -0.166241 | 0.047336 | -3.511964 | 0.0019 |
| D(CICLOS(-1),3) | 0.840911 | 0.105833 | 7.945617 | 0.0000 |
| C | 0.000328 | 0.000256 | 1.281204 | 0.2129 |
| R-squared | 0.743970 | Mean dependent var | | -7.78E-05 |
| Adjusted R-squared | 0.721706 | S.D. dependent var | | 0.002123 |
| S.E. of regression | 0.001120 | Akaike info criterion | | -10.64277 |
| Sum squared resid | 2.89E-05 | Schwarz criterion | | -10.49761 |
| Log likelihood | 141.3560 | Hannan-Quinn criter. | | -10.60097 |
| F-statistic | 33.41660 | Durbin-Watson stat | | 1.689708 |
| Prob(F-statistic) | 0.000000 | | | |

Anexo 9: Estimación de parámetros modelo del multiplicador acelerador lineal

a) Estimando como modelo de rezagos distribuidos en economía cerrada:

| Source | SS | df | MS | | | |
|----------|------------|----|------------|-----------------|----------|--|
| Model | 1.1995e+16 | 2 | 5.9973e+15 | Number of obs = | 28 | |
| Residual | 5.0412e+12 | 26 | 1.9389e+11 | R-squared = | 0.9996 | |
| | | | | Adj R-squared = | 0.9995 | |
| | | | | Root MSE = | 440331.6 | |
| Total | 1.2000e+16 | 28 | 4.2856e+14 | Res. dev. = | 805.1214 | |

| Y | Coef. | Std. Err. | t | P> t | [95% Conf. Interval] | |
|----|----------|-----------|--------|-------|----------------------|----------|
| /c | .8791784 | .0070072 | 125.47 | 0.000 | -.8647748 | .893582 |
| /a | 1.146344 | .2137296 | 5.36 | 0.000 | .7070165 | 1.585672 |

b) Estimando como modelo de corrección de errores en economía cerrada:

| Source | SS | df | MS | | | |
|----------|------------|----|------------|-----------------|----------|--|
| Model | 1.2789e+13 | 2 | 6.3943e+12 | Number of obs = | 28 | |
| Residual | 5.0412e+12 | 26 | 1.9389e+11 | R-squared = | 0.7173 | |
| | | | | Adj R-squared = | 0.6955 | |
| | | | | Root MSE = | 440331.5 | |
| Total | 1.7830e+13 | 28 | 6.3678e+11 | Res. dev. = | 805.1214 | |

| DY | Coef. | Std. Err. | t | P> t | [95% Conf. Interval] | |
|----|----------|-----------|--------|-------|----------------------|----------|
| /c | .8791784 | .0070072 | 125.47 | 0.000 | -.8647748 | .893582 |
| /a | .073172 | .1068648 | 0.68 | 0.500 | -.1464918 | .2928358 |

c) Estimando la tasa de crecimiento del gasto como modelo de corrección de errores:

| Source | SS | df | MS | | | |
|----------|------------|----|------------|-----------------|----------|--|
| Model | 3.9342e+10 | 1 | 3.9342e+10 | Number of obs = | 28 | |
| Residual | 3.3723e+11 | 27 | 1.2490e+10 | R-squared = | 0.1045 | |
| | | | | Adj R-squared = | 0.0713 | |
| | | | | Root MSE = | 111757.9 | |
| Total | 3.7657e+11 | 28 | 1.3449e+10 | Res. dev. = | 729.3913 | |

| DG | Coef. | Std. Err. | t | P> t | [95% Conf. Interval] | |
|----|----------|-----------|------|-------|----------------------|----------|
| /g | .0155537 | .0087636 | 1.77 | 0.087 | -.0024277 | .0335351 |

d) Estimando como modelo de rezagos distribuidos en economía abierta:

| Source | SS | df | MS | | | |
|----------|------------|----|------------|-----------------|---------|--|
| Model | 1.1981e+16 | 2 | 5.9903e+15 | Number of obs = | 28 | |
| Residual | 1.9127e+13 | 26 | 7.3565e+11 | R-squared = | 0.9984 | |
| | | | | Adj R-squared = | 0.9983 | |
| | | | | Root MSE = | 857699 | |
| Total | 1.2000e+16 | 28 | 4.2856e+14 | Res. dev. = | 842.458 | |

| Y | Coef. | Std. Err. | t | P> t | [95% Conf. Interval] | |
|----|----------|-----------|-------|-------|----------------------|----------|
| /c | .8909585 | .013649 | 65.28 | 0.000 | .8629025 | .9190144 |
| /a | .9092615 | .4078339 | 2.23 | 0.035 | .0709469 | 1.747576 |

e) Estimando como modelo de corrección de errores en economía abierta:

| Source | SS | df | MS | | | |
|----------|-------------|----|-------------|--|-----------------|---------|
| Model | -1.2971e+12 | 2 | -6.4854e+11 | | Number of obs = | 28 |
| Residual | 1.9127e+13 | 26 | 7.3565e+11 | | R-squared = | -0.0727 |
| Total | 1.7830e+13 | 28 | 6.3678e+11 | | Adj R-squared = | -0.1553 |
| | | | | | Root MSE = | 857699 |
| | | | | | Res. dev. = | 842.458 |

| DY | Coef. | Std. Err. | t | P> t | [95% Conf. Interval] | |
|----|-----------|-----------|-------|-------|----------------------|----------|
| /c | .8909585 | .013649 | 65.28 | 0.000 | .8629025 | .9190145 |
| /a | -.0453692 | .203917 | -0.22 | 0.826 | -.4645266 | .3737881 |

Anexo 10: Estimación de parámetros modelo del multiplicador acelerador no lineal

a) Estimación de parámetros en su forma reducida:

Dependent Variable: D(Y)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1982 2009

Included observations: 28 after adjustments

$D(Y) = C(2) * D(Y(-1)) + (C(2) + C(3)) * Y(-2) + C(4) * (X - M + FBK + G) - Y(-1)$

| Variable | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|----------|
| C(2) | 1.541187 | 0.186478 | 8.264712 | 0.0000 |
| C(3) | -0.568760 | 0.171675 | -3.313007 | 0.0028 |
| C(4) | 0.155903 | 0.127028 | 1.227310 | 0.2311 |
| R-squared | 0.634342 | Mean dependent var | | 5.71E+08 |
| Adjusted R-squared | 0.605089 | S.D. dependent var | | 5.68E+08 |
| S.E. of regression | 3.57E+08 | Akaike info criterion | | 42.32344 |
| Sum squared resid | 3.18E+18 | Schwarz criterion | | 42.46617 |
| Log likelihood | -589.5281 | Hannan-Quinn criter. | | 42.36707 |
| Durbin-Watson stat | 1.807747 | | | |

b) Estimación del acelerador:

Dependent Variable: D(Z,2)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1982 2009

Included observations: 28 after adjustments

$$D(Z,2)=(D(Z)*(1-(Z*Z)))*(C(1)-2.30989079196846-(1-0.8231377586274)*1.5793719051819)-Z$$

| Variable | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------|
| C(1) | 4.329768 | 0.157040 | 27.57107 | 0.0000 |
| R-squared | 0.756387 | Mean dependent var | | -0.001472 |
| Adjusted R-squared | 0.756387 | S.D. dependent var | | 0.019579 |
| S.E. of regression | 0.009663 | Akaike info criterion | | -6.405868 |
| Sum squared resid | 0.002521 | Schwarz criterion | | -6.358289 |
| Log likelihood | 90.68215 | Hannan-Quinn criter. | | -6.391322 |
| Durbin-Watson stat | 1.827811 | | | |

c) Estimación de la tendencia lineal:

Dependent Variable: LNY_HP

Method: Least Squares

Date: 09/28/10 Time: 19:19

Included observations: 30

| | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------|
| C | 23.24889 | 0.025628 | 907.1508 | 0.0000 |
| @TREND | 0.028927 | 0.001518 | 19.06046 | 0.0000 |
| R-squared | 0.928444 | Mean dependent var | | 23.66833 |
| Adjusted R-squared | 0.925888 | S.D. dependent var | | 0.264289 |
| S.E. of regression | 0.071949 | Akaike info criterion | | -2.361385 |
| Sum squared resid | 0.144945 | Schwarz criterion | | -2.267972 |
| Log likelihood | 37.42078 | Hannan-Quinn criter. | | -2.331502 |
| F-statistic | 363.3011 | Durbin-Watson stat | | 0.113203 |
| Prob(F-statistic) | 0.000000 | | | |

d) Estimación del componente no lineal con respecto a una función con seno:

Dependent Variable: D(CICLOS,2)

Method: Least Squares

Sample (adjusted): 1982 2009

Included observations: 28 after adjustments

Convergence achieved after 16 iterations

D(CICLOS,2)=-C(1)*C(2)*C(2)*SIN(C(2)*@TREND+C(3))

| Variable | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------|
| C(1) | 0.051158 | 0.008519 | 6.005156 | 0.0000 |
| C(2) | 0.346230 | 0.017181 | 20.15213 | 0.0000 |
| C(3) | 2.116640 | 0.287978 | 7.350011 | 0.0000 |
| R-squared | 0.549920 | Mean dependent var | | 0.002553 |
| Adjusted R-squared | 0.513913 | S.D. dependent var | | 0.004737 |
| S.E. of regression | 0.003302 | Akaike info criterion | | -8.487396 |
| Sum squared resid | 0.000273 | Schwarz criterion | | -8.344660 |
| Log likelihood | 121.8235 | Hannan-Quinn criter. | | -8.443760 |
| Durbin-Watson stat | 0.190563 | | | |

El desafío de las energías renovables para su inserción a mayor escala en el mercado eléctrico boliviano

Challenge of the Renewable Energies for its Insertion on Greater Scale in the Bolivian Electrical Market

*Ramiro Rojas Zurita**

*Miguel Fernandez Fuentes***

*Renán Orellana Lafuente****

Resumen

El artículo presenta un análisis de las opciones para una mayor inserción de las energías renovables en el mercado eléctrico boliviano. Se realiza una evaluación de la situación actual de las energías renovables en Bolivia, con énfasis en la electrificación rural; se presenta también una rápida caracterización del sector eléctrico boliviano.

Sobre la base de datos actuales, se analizan dos casos, la conexión de sistemas fotovoltaicos a la red de Baja Tensión (BT) y las microcentrales hidroeléctricas, suministrando energía en la red de Media Tensión (MT), así como condiciones necesarias para la realización de dichas conexiones. El artículo concluye señalando la necesidad de contar con normativa que incentive la implementación de sistemas de generación distribuida con energías renovables.

* Doctorado en Energía y Desarrollo- UMSS-USP ramirorz77@yahoo.com

** Doctorado en Energía y Desarrollo- UMSS-USP miguel@energética.org.bo

*** Doctorado en Energía y Desarrollo- UMSS-USP renanorellana@yahoo.es

Abstract

The article presents/displays an analysis of the options for a greater insertion of the renewable energies in the Bolivian electrical market. An evaluation of the present situation of the renewable energies is realised in Bolivia, with emphasis in the rural electrification; also appears a fast characterization of the Bolivian electrical sector. On the present data base, two cases are analyzed, the hydroelectric connection of photovoltaic systems to the Baja network Tensión (BT) and micropower stations providing necessary energy in the Media network Tensión (MT), as well as conditions for the accomplishment of these connections. The article concludes on the necessity to count on norm that stimulates the implementation of systems of generation distributed with renewable energies.

Palabras clave: Energías renovables, generación distribuida, sistema eléctrico boliviano.

Keywords: Renewable energies, distributed generation, Bolivian electrical system.

Clasificación/classification JEL: p28, Q42, O13

1. Introducción

El incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero y la elevación del precio de los combustibles ha determinado que en el mundo se busquen otras fuentes energéticas como alternativa para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y evitar los Gases de Efecto Invernadero (GEI). A partir de las crisis del petróleo de los años 1973, 1978 y 2007, que dieron lugar a la elevación de los precios sucesivamente, han surgido varias iniciativas para sustituir los combustibles fósiles, y como alternativa se encuentran las energías renovables.

La combustión produce gas carbónico (CO_2), óxido nítrico (NO_x), gases sulfurosos (SO_x), vapor de agua (H_2O) y otros con efectos menores sobre la atmósfera. Entre ellos se ha comprobado que los principales gases de la combustión que producen el efecto invernadero son el vapor de agua (H_2O) y el dióxido de carbono (CO_2), debido a que son los que capturan la mayor cantidad de energía proveniente del sol. La energía capturada es distinta, siendo la más nociva la del CO_2 , porque captura los rayos infrarrojos y tiene un ciclo de cerca de 200 años. En la actualidad, la acción del aumento del consumo de energía produce un desequilibrio entre la absorción de CO_2 y las emisiones; el 95 por ciento del CO_2 producido es absorbido y

el 5 por ciento restante queda en la atmósfera, produciendo, durante su ciclo, la acumulación del contenido de CO₂ en la atmósfera.

Existen otros elementos contaminantes producidos por otras actividades, como el gas metano, principalmente, en las que el hombre está involucrado. En el caso que nos compete, los proyectos hidroeléctricos con grandes embalses que inundan regiones con vegetación, ésta se descompone produciendo gas metano expedido a la atmósfera. Las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs o MCHs) pueden evitar estos efectos, aunque logrando menores potencias y en consecuencia menor generación de energía.

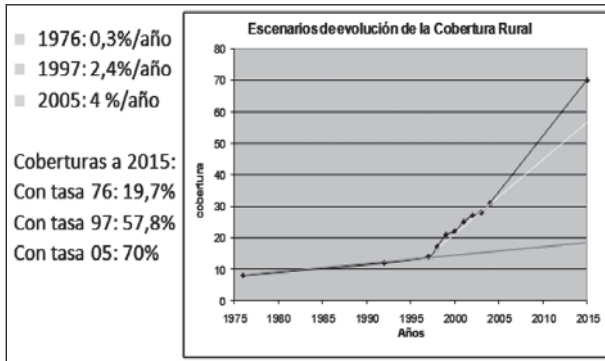
En las últimas dos décadas se han intensificado los estudios y se ha mejorado la tecnología de los proyectos de Energías Renovables (ERs), especialmente de aquéllos que pueden conectarse a la red, como alternativa de modificación de la matriz energética de los diferentes países.

2. Las energías renovables en el área rural de Bolivia

Al año 2007, se estimó que casi 3 millones de habitantes rurales de Bolivia (unos 500.000 hogares) no tenían acceso a la energía eléctrica, y muchos de ellos a ningún tipo de energía comercial. De ese total, cerca de 200.000 hogares radican en localidades donde presumiblemente existen redes eléctricas, y por tanto su conexión corresponde a un proceso de densificación del servicio ya establecido. El saldo debería ser atendido por fuentes descentralizadas de suministro de energía.

De esta manera, se estima que unos 200.000 hogares rurales puedan ser atendidos mediante la utilización de energías renovables descentralizadas (fundamentalmente sistemas fotovoltaicos o pequeños aerogeneradores), y que unos 100.000 hogares puedan ser atendidos con sistemas aislados de mini-redes con diversas fuentes (diesel, hidráulica, biomasa, sistemas híbridos, etc.). (ver Gráfico 1).

Gráfico 1: Desafíos para la electrificación rural



Fuente: Energética (2009)

Cuadro 1

| Periodo | Incremento cobertura | Proyección de cobertura al año 2015 |
|---------|----------------------|-------------------------------------|
| 1976 | 0.3%/año | 19.7% |
| 1997 | 2.4 %/año | 57.8% |
| 2005 | 4.0 %/año | 70% |

Fuente: Elaboración propia. Datos del VMEEAT 2005

Es decir, de los 3 millones de habitantes rurales sin energía, la red eléctrica quizás llegue a abastecer al 30 por ciento. Así, un 70 por ciento de la población tendría como alternativa la provisión de electricidad con energías renovables o recurrir a generadores a gasolina o diesel. Adicionalmente, en las demandas térmicas para cocción de alimentos, 600 mil hogares que usan fogones de leña podrían optar por cocinas eficientes de leña.

La necesidad de impulsar los usos productivos de la energía y fortalecer los servicios sociales y comunales sólo será posible si existe un suministro confiable, seguro y económico de la energía; de esta manera la energía se convertirá en un factor que genere desarrollo.

Así, el desafío para las energías renovables en el área rural es abastecer con energía a casi 2 millones de personas en los próximos años. Disgregando este relevamiento por tecnología, un escenario de introducción y los posibles impactos podría ser el que se ve en el Cuadro 1.

Cuadro 2
Escenario de introducción de energías renovables en Bolivia (área rural)

| Tecnología | Impacto: desplaza o sustituye | Observaciones |
|---|---|--|
| Al menos 150.000 sistemas fotovoltaicos domésticos | 2,4 millones de litros de diesel/año (mecheros) 12 millones/año de velas 300.000 /GLP año (lámparas a GLP) 4,8 millones de pilas/año (uso en radio / linterna) | Instalaciones fundamentalmente domésticas y sociales de pequeña potencia |
| Al menos 1.100 sistemas de bombeo Fotovoltaicos comunales | 6,6 millones litros de diesel/año | Instalaciones en comunidades semi-nucleadas para el abastecimiento de agua potable y abrevaderos de ganado |
| 500.000 cocinas eficientes de leña | 1 millón de toneladas de madera/año | Sustitución de fogones tradicionales de leña |
| 50.000 biodigestores | 215.000 toneladas de CO ₂ /año | Instalación en las zonas con potencial ganadero |
| 300 micro centrales hidroeléctricas | millones de litros diesel/año | En regiones de la cordillera con alto potencial hidroeléctrico. Posible interconexión a la red |
| 2.500 aerogeneradores | 60.000 litros diesel/año 300.000 velas/año | Sistemas aislados para abastecimiento doméstico y social prioritariamente. |
| 4.000 sistemas termosolares (sociales) | 4.241 toneladas de CO ₂ /año | Sistemas de uso social en escuelas y postas en comunidades aisladas para provisión de agua caliente para uso sanitario |
| 1.000 sistemas híbridos en el norte del país | 15 millones de litros diesel/año | Sistemas de microredes que funcionan con diesel y serían sustituidos por aceite vegetal en combinación con solar/hidro |

Fuente: Elaboración propia

3. Potencial para la interconexión de las ER's a la red

3.1. Generación distribuida

De momento, en el área urbana, las alternativas renovables que se perciben con mayor potencial son los sistemas termosolares. Actualmente, el calentamiento de agua se realiza con electricidad de manera mayoritaria y con gas licuado de petróleo (GLP) o gas natural (GN). Este último energético, a pesar de ser una opción económica por el sistema de precios del GN en Bolivia, lamentablemente no es aún una opción real, pues la penetración en las ciudades

no alcanza al 7 por ciento. En ese sentido, la electricidad, y, consiguientemente, las duchas eléctricas, son la opción más extendida.

Un análisis de introducción potencial de sistemas termosolares estima en 200.000 unidades familiares. Actualmente se instalan cerca a 400 unidades/año y se estima en poco más de 3000 unidades en funcionamiento en el país.

Una ventaja de estos sistemas es que su repago podría realizarse en 3 a 4 años, en función del uso. Adicionalmente se pueden prever opciones de uso de tipo industrial para el precalentamiento de agua y también su aplicación en mayor escala en hoteles.

Por otro lado, la interconexión de las ER's a las redes eléctricas existentes, fundamentalmente en entornos urbanos y rurales, se muestra como una oportunidad importante que permitiría que pequeños generadores se conecten directamente a los sistemas de distribución. Generadores fotovoltaicos, eólicos e inclusive microcentrales o picocentrales hidroeléctricas en rangos de 1 kW hasta 300 kW podrían inyectar directamente electricidad en baja tensión.

Esta opción se enmarca en el concepto de generación distribuida, como una nueva opción mediante la cual se pretende generar la energía en el lugar de consumo. Naturalmente que se debe construir una serie de mecanismos operativos, normativos y técnicos para avanzar en estos temas.

Los beneficios para el generador son múltiples, pues se incrementa la confiabilidad, aumenta la calidad y el uso de la energía se hace más eficaz, mientras que para el suministrador disminuyen las pérdidas de transmisión y distribución, liberando capacidad del sistema; asimismo, hay un mejor control de reservas y regulación, bajando los índices de fallas.

3.2. Sistemas fotovoltaicos

Como experiencia piloto de un generador fotovoltaico conectado a la red, ENERGÉTICA, en Cochabamba, tiene aún la única instalación en Bolivia donde se está probada la tecnología. Si bien la venta de energía no se vislumbra como un negocio por los bajos costos actuales de la electricidad (a causa del precio del gas para generación de electricidad), la generación para consumo propio sí podría ser interesante, lo cual se muestra en varias publicaciones.

En caso de vender la energía generada en las actuales condiciones normativas, el repago de cualquier central fotovoltaica sería de 150 años; sin embargo, si esta energía se la autoconsume en uso domiciliario, el periodo de repago se reduce a 22 años; de usarse la energía en locales comerciales, con las actuales tarifas, el repago es de menos de 12 años. Esto muestra inicialmente condiciones de partida razonables, ya que los paneles fotovoltaicos tienen garantía de 25 años y vida útil de más de cuarenta años. En términos de rentabilidad, una instalación de ese tipo tendría 7.5 por ciento anual, que es un valor bajo respecto al 12 por ciento usualmente utilizado como referencia. Pero, si se lo compara con las tasas pasivas del sistema bancario (0.9 por ciento en depósitos a plazo fijo y cajas de ahorro), actualmente representa una alternativa de inversión atractiva.

3.3. Pequeñas centrales hidroeléctricas

ENERGÉTICA también ha estudiado la posibilidad de interconexión de MCH a redes en baja tensión, y para el caso de La Paz se ha estimado que los costos de producción de electricidad con MCH de 100 kW y factor de planta de un 60 por ciento estarían alrededor de 57 \$US/MWh. De venderse esta energía a la tarifa del nodo de referencia para zona, apenas se recupera el 56 por ciento del costo de producción, incurriendo en un déficit neto del 44 por ciento.

Si se calculan los costos de energía que tiene la distribuidora de la zona, se estima que, para ella, disponer de electricidad en baja tensión cuesta aproximadamente 51 \$US/MWh (considerando el costo de la energía, la transmisión, las pérdidas y los pagos por peajes de uso de líneas de transmisión). En ese caso, la diferencia entre los costos de producción de una MCH y la posibilidad de que la distribuidora retribuya correctamente a la MCH por la energía, establece una diferencia de 10 por ciento, ya susceptible de negociación, pues aún se pueden estimar las pérdidas por fallas, la mejor estabilidad de la red, reducción de emisiones de CO₂, reducción de consumo de gas (con disponibilidad para exportación), como beneficios que favorecerían la inyección de electricidad por parte de la MCH. Un factor más a considerar es que el precio de venta de la energía a los clientes residenciales de la distribuidora, en ese mismo punto, es de 84 \$US/MWh, y a los clientes comerciales es de 101 \$US/MWh.

De existir una normativa que permita a esta MCH inyectar su energía a la red, y que, por ejemplo, usuarios comerciales puedan comprarle directamente a la MCH, se muestra otro campo de compra-venta de energía a pequeña escala no normado en este momento.

Para una meta inicial de introducción de ER's en generación distribuida, se considera el desplazamiento de la generación a diesel que actualmente aun tiene el SIN con un aporte entre 18 MW y 30 MW (ver Cuadro 3).

Cuadro 3
Escenario de introducción de energías renovables en Bolivia (área urbana)

| Tecnología | Impacto: desplaza o sustituye | Observaciones |
|---|--|---|
| Al menos 200.000 sistemas termosolares para calentamiento de agua | Desplaza 219.000 MWh/mes de electricidad | Instalaciones fundamentalmente domésticas y en menor cantidad aplicaciones en hoteles y escuelas. |
| Sistemas fotovoltaicos conectados a la red, 30 MW | Desplazaría unos 54.000 MWh/año del SIN† | Instalaciones en techos urbanos de ciudades y colas de red. El potencial se calcula con la intención de desplazar el consumo de diesel actual en el SIN |

Fuente: Elaboración propia

4. Sistemas de ER's interconectados al SIN

Los mayores potenciales para interconectar sistema de gran potencia están en las centrales hidroeléctricas, los parques eólicos, las plantas de geotermia y las centrales de biomasa, así como, eventualmente, en las centrales solares fotovoltaicas y las centrales solares térmicas.

En los planes actuales del Gobierno aparecen de forma nítida las grandes centrales hidroeléctricas. El Plan Estratégico de la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE) tiene planificado un parque eólico de 5 MW y también el relanzamiento de la generación con geotermia. En cuanto a la biomasa, está en marcha la segunda fase de la central de bagazo en Santa Cruz. Las centrales solares fotovoltaicas o solares térmicas no aparecen, a no ser en algunas declaraciones del Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas (VMEEA), en las que se expone que son muy caras y que no se promocionarán aún.

Así, el detalle de proyectos existentes en el momento es el siguiente:

Hidroelectricidad:

- ♦ Misticuni 80 MW
- ♦ San José 127 MW

- ♦ Miguillas 250 MW
- ♦ Rositas 400 MW
- ♦ Tahuamanu 6 MW
- ♦ Cachuela Esperanza 800 MW

Geoterminia:

- ♦ Laguna Colorada: 100 MW

Eólica: 5 MW (sin especificación de lugar).

En todo caso, la rentabilidad de estos proyectos está en entredicho, porque los costos de producción de energía son mayores a los actualmente existentes. La razón principal es el bajo precio del gas natural para consumo interno en Bolivia.

5. Barreras

Existen barreras que impiden el acceso de energías renovables al SIN. Las barreras son de distinto tipo, entre legales, económico-financieras, constructivas y otras propias de la operación y los requerimientos del sistema. Estas barreras no son independientes unas de otras y pueden ser superadas con medidas enmarcadas en la legislación boliviana y sin causar daño económico a la sociedad, retribuyendo los beneficios de los emprendimientos con fuentes renovables, comparados con las condiciones existentes. Las barreras identificadas son legales, económico-financieras y operativas.

5.1. Barreras legales

La Ley de Electricidad 1604, de diciembre de 1994 fue confeccionada con el fin de transformar el mercado eléctrico, hasta ese momento en manos del Estado, a través de ENDE, en un mercado competitivo. La causa principal para cambiar el sector eléctrico fueron las ineficiencias que encarecían el suministro de electricidad y la pesadez del sistema administrativo, que había creado una burocracia en continuo aumento. El principio de mercado competitivo está basado en la oferta de productos con el mismo nivel de calidad, con precios que compitan, mejorando continuamente la eficiencia.

El diseño del mercado eléctrico boliviano se basa en un sistema desagregado verticalmente. En el caso de los distribuidores, se permite la generación con recursos renovables de hasta el 15 por ciento de su demanda. Las restricciones impuestas por la ley determinan elevados costos de conexión, el sistema de comunicación y la permanente información necesaria para la operación en tiempo real. El artículo 15, inciso d, de la Ley de Electricidad, representa el único incentivo para el uso de fuentes alternativas para los distribuidores.

Si bien se ha inducido a la generación con recursos renovables, este incentivo no es suficiente y debe ser complementado con medidas que dinamicen los procedimientos de inclusión de energías alternativas al SIN, tales como:

- ♦ El cambio a la nueva Ley de Electricidad trae una incertidumbre que puede atrasar las inversiones en el sector. Se debería efectuar el cambio a la brevedad posible.
- ♦ Se necesita una ley de promoción que dé estabilidad a la operación de centrales con fuentes de energía renovable, durante toda su vida útil, garantizando la recuperación de capital.
- ♦ Se necesita el traspaso de los bonos de CO₂ al generador con una estructura acorde a los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) que contemple el acceso de generadores con capacidades menores a 30 MW.

El 7 de febrero de 2009 ha sido promulgada la nueva Constitución Política de Bolivia, determinando cambios fundamentales en el marco normativo, como la imposibilidad de realizar concesiones sobre los recursos naturales. El cambio normativo de Bolivia presenta un momento propicio para poder incluir en la legislación una normativa que incentive el desarrollo de los proyectos de energías renovables de forma técnica y económica.

5.2. Barreras económico-financieras

Las barreras económico-financieras son las más significativas para el acceso de energías renovables alternativas. Su influencia está centrada en dos aspectos:

- ♦ La remuneración por la actividad y la falta de incentivos.
- ♦ El financiamiento, con condiciones difíciles de recuperación del capital.

Estos dos problemas tienen su origen en las distorsiones del mercado regulatorio, en el cual el componente básico es la generación en base a gas natural con un costo subvencionado

para el consumo interno. Este costo no permite la libre competencia entre los agentes del mercado.

El sistema eléctrico, inicialmente con mayor participación hidroeléctrica (cerca de 60 por ciento en 1990), a partir de las reglas del mercado adoptadas con la Ley 1604 del año 1994, ha llegado actualmente al 60 por ciento de capacidad térmica y al 40 por ciento de capacidad hidroeléctrica.

El incremento de participación de las unidades térmicas en el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) muestra la poca competitividad de las tecnologías de generación que existen en el mercado, dando lugar a señales distorsionadas, que si bien mantienen las tarifas de electricidad, no son suficientes para el desarrollo de otras tecnologías de generación.

En general, el aprovechamiento de energías renovables es mucho más costoso tanto económicamente como en los detalles de la tecnología utilizada. Estos costos elevados son equilibrados de manera inicial con los créditos de CO₂, que en algunos escenarios energéticos resulta conveniente para las inversiones, pero en otros, como en Bolivia, requiere aún de algunos incentivos que mejoren las condiciones económicas y hagan los proyectos factibles.

5.3. Estructura de precios de generación en el MEM

La legislación vigente tiene aspectos que limitan la competencia para el acceso a distintas tecnologías de generación de energía, debido a la subvención del gas natural, ocasionando que no exista rentabilidad para tecnologías que no sean provenientes de otros recursos distintos de la quema del GN.

El precio de la potencia es calculado en base al costo de inversión necesario para la instalación de una turbina a gas y el precio de la energía es determinado por el sistema de costos marginales correspondiente al costo de operación de una turbina a gas.

El valor del GN como energético usado en el mercado eléctrico está fijado por el Gobierno en 1.3 US\$/MPC. Inicialmente, en 1996, constituía un equilibrio para el momento de la transición al modelo de mercado de esa época, actualmente todavía vigente, que en un inicio tenía un tope mínimo en 0.60 US\$/MPC. Entonces las reglas del mercado permitían un juego en el margen que daban el máximo y el mínimo entre los generadores térmicos. En ese escenario fueron efectuados proyectos hidroeléctricos cuyo equilibrio económico pasó por etapas en las cuales la sobreoferta de generación térmica disminuyó los costos marginales,

inciendiando en los ingresos de todos los generadores y poniendo en riesgo las inversiones de las nuevas centrales de generación hidráulica, que en algún caso pudieron equilibrar sus ingresos mediante los bonos de carbono. Actualmente, la economía de estas empresas es estable, pero sin muchas oportunidades de inversiones futuras.

La causa principal del problema es la subvención del precio del GN; nuevas inversiones en el área de recursos renovables, cuyo costo de operación es mínimo porque no usan combustibles, tienen mayores costos de inversión en los equipos y las obras que no pueden ser cubiertos por el sistema actual de precios de generación. Con esta metodología, el camino de la expansión se inclina a proyectos de energía con la tecnología del GN.

5.4. Costos de la energía

En los países vecinos, los costos de energía eléctrica producida tienen estándares que reflejan el valor real de la energía. Los costos de energía producida por sistemas hidráulicos de gran tamaño, para pequeña caída y gran caudal, en la actualidad superan los 60 US\$/MWh. Las centrales hidráulicas de menor tamaño tienen costos que superan estos valores. El principal factor del que depende el costo es, en general, el tamaño del aprovechamiento (para instalaciones de gran tamaño, se producen economías de escala, logrando costos bajos de instalación). Las tecnologías de aprovechamiento dependen también de la altura de la caída y el caudal de diseño. Para todos los casos, la construcción de embalses eleva los costos de las centrales, siendo los embalses fundamentales para la operación de las centrales en la época de estiaje.

Además de los costos de producción de las centrales, existe el precio de energía y potencia que deben pagar los costos de producción. Si a estos elementos adicionamos el precio del GN de 1.3 US\$/MPC, en Bolivia, un precio que define una tarifa plana (energía y potencia) aproximadamente del orden de 26 US\$/MWh, y considerando que los proyectos de aprovechamiento de otro tipo de energías sobrepasan los 60 US\$/MWh, se llega a la conclusión que es necesario hacer un alto para pensar en la posibilidad de buscar una forma de hacer rentables los aprovechamientos de otro tipo de energías.

Los costos de generación de energía y los costos de potencia serán incrementados a mediano y largo plazo, debido al costo de los insumos, que tienden a aumentar, lo que significa que necesariamente existirá un incremento de tarifas. Este incremento beneficiará a los proyectos con energías renovables.

El nivel actual del sistema de precios se debe a que el sistema se basó en las inversiones realizadas en el proceso de capitalización, que además corresponden a costos constructivos de equipos ya depreciados.

6. Conclusiones

Los mecanismos necesarios para la expansión de las ER's en Bolivia difieren sustancialmente, en función del sector en el cual se quiere trabajar.

- a) En el área rural, la introducción de ER's cubre una diversidad de demandas y también hay una variedad de tecnologías, por tanto no existirá un solo mecanismo, sino varios que combinen esquemas tarifarios (como en las miniredes), subsidio a la inversión y micro crédito (como el caso de cocinas de leña, sistemas fotovoltaicos aislados o biodigestores), o subsidios a la inversión (sistemas de bombeo de agua y microcentrales hidroeléctricas).
- b) En el caso urbano, aparecen al menos dos mecanismos posibles de aplicar. Para la generación de electricidad se debe desarrollar los conceptos de la generación distribuida, promover el autoconsumo de energía y los "depósitos de energía" en las redes que provengan de los microgeneradores urbanos, con la posibilidad de recuperación posterior. Para el caso de otras opciones, como los sistemas termosolares, el mecanismo más importante parece ser el microcrédito, y los incentivos como parte de la eficiencia energética que se puedan expresar en descuentos tarifarios o impositivos.
- c) Para la generación a gran escala (parques eólicos, grandes centrales hidroeléctricas, geotermia, etc.) la discusión sobre el precio del gas es fundamental, de otra manera se comprometerá la viabilidad de estas alternativas. En su defecto se hace necesario plantear un nuevo sistema de cálculo de precios que reconozca la ventajas ambientales y de sostenibilidad de las energía renovables.

Referencias

1. Alarcón Rodríguez, D., R.A. Currie, G.W. Ault y J.R. McDonalds. (2006). “*Planning Highly Distributed power systems: Effective Techniques and tools*”. *International Journal of Distributed Energy Resources*, 4 (1), 35-53.
2. Buzarquis, E., O. A. Ojeda y F. F. Garcés (2009). “Optimización del tamaño y ubicación de generación distribuida en las redes de distribución con base en energías renovables como fuentes primarias de suministro de energía” (estado del arte). XIII Eriac Décimo Tercer Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré.
3. Cadena, I., S. Botero, C. Tautiva, L. Betancur y D. Vesga. “Regulación para incentivar las energías alternas y la generación distribuida en Colombia”. *Revista de ingeniería*. Universidad de los Andes (28), 90-98. Bogotá, Colombia.
4. Celli, C. y F. Pilo (2001). “Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Networks”. *IEEE Transactions on Power Systems*.
5. Fernández F, M. (2009). “Oportunidad de las energías renovables en Bolivia”. Sistema de Información Sectorial. Boletín IBNORCA. La Paz, Bolivia.
6. Gobierno de Bolivia. Comité Nacional de Despacho de Carga (CNDC). Memoria anual CNDC, gestión 2009.
7. Gobierno de Bolivia. Ley 1604 de Electricidad. Gaceta Oficial de Bolivia. 1994.
8. Gobierno de Chile. Ley N° 19.940 del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, que “Regula Sistemas de Transporte de Energía Eléctrica”, Chile 2004.
9. Herrera B., J. (2009). Normativa chilena referida a generación distribuida como agente del mercado eléctrico. EIE561 – Distribución Eléctrica, PUCV.
10. International Energy Agency (IEA). 2002. *Distributed generation in liberalised electricity markets*. New York: Ed. IEA. pp.1-125.
11. López–Lezama, M., A. Padilha–Feltrin y L. A. Gallego–Pareja (2009). “*Alocacao otima de geracao distribuida em sistemas de energia eletrica*”. *Revista de Ingeniería y Ciencia*, 5 (9), 9–23.

12. Mantilla, J.M., C.A. Duque y H.G. Ureña (2008). “Análisis del esquema de generación distribuida como una opción para el sistema eléctrico colombiano”. Revista de la Facultad de Ingeniería, (44), 97-110. Universidad de Antioquia.
13. Meyers, E. y M. Hu. (2001). “*Clean distributed generation: Policy options to promote clean air and reliability*”. *The Electricity Journal*, (14), 89–98.
14. Mocarquer, S. y H. Rudnick (2008). Recursos renovables como generación distribuida en sistemas eléctricos. Chile.
15. Morgan, M. y H. Zerriffi (2002). “The regulatory environment for small independent micro-grid companies”. *The Electricity Journal*, (15), 52-57.
16. Orellana, L., R. (2008). Análisis rápido de la interconexión de MCH ‘s al SIN”. Informe interno para el estudio “Diagnóstico del sector energético boliviano” WWF. ENERGETICA. Cochabamba, Bolivia.
17. Adicionalmente, se consideran varios estudios y datos disponibles en talleres nacionales e internacionales en www.elecsolrural.org, www.crecerconenergia.net, www.idtr.gov.bo, así como información del estudio Agua Limpia con Energía Limpia IEE; presentaciones taller Mejora del Acceso a la Energía en Comunidades Rurales, Plan Electricidad para Vivir con Dignidad, Plan de ENDE 2009, etc.