

# Índice

<b>Presentación.....</b>	<b>7</b>
<b>La brecha entre la fecundidad deseada y la observada en Montevideo y su Área Metropolitana .....</b>	<b>11</b>
<i>Verónica Amarante, Wanda Cabella</i>	
<b>La creciente heterogeneidad en la edad al primer hijo en el Uruguay: un análisis de las cohortes de 1951 a 1990 .....</b>	<b>35</b>
<i>Mathias Nathan</i>	
<b>Las desigualdades de clase en el comportamiento reproductivo en el Brasil: democratización incompleta y paradojas de la fecundidad juvenil .....</b>	<b>61</b>
<i>Nathalie Reis Itaboraí</i>	
<b>El papel de la migración en el sistema global de reproducción demográfica .....</b>	<b>91</b>
<i>Alejandro I. Canales</i>	
<b>Rumbos (des)encaminados hacia una frontera demográfica: repensando las contribuciones de la demografía a los estudios de frontera .....</b>	<b>125</b>
<i>Juliana Siqueira, Dimitri Fazito, Roberto Luís Monte-Mór</i>	
<b>El perfil social y territorial de la cohabitación en Colombia: un análisis multinivel .....</b>	<b>145</b>
<i>Anny Carolina Saavedra, Albert Esteve, Julián López Colás</i>	
<b>Una aproximación bayesiana a la medición de la vulnerabilidad poblacional a desastres naturales: estudio de caso para el Estado Plurinacional de Bolivia.....</b>	<b>171</b>
<i>Rolando Gonzales Martínez</i>	
<b>La discapacidad en América Latina: reflexiones en torno a la medición de un fenómeno complejo en una región demográfica heterogénea .....</b>	<b>195</b>
<i>Gladys Margarita Massé, María Cecilia Rodríguez Gauna</i>	
<b>El espacio residencial del cuidado de los adultos mayores en América Latina y España .....</b>	<b>223</b>
<i>Nélida Redondo, Montserrat Díaz Fernández, María del Mar Llorente Marrón, Sagrario Garay, Carolina A. Guidotti González, Lourdes M. Mendoza Villavicencio</i>	
<b>Orientaciones para los autores .....</b>	<b>259</b>
<b>Guidelines for authors .....</b>	<b>261</b>
<b>Publicaciones recientes de la CEPAL .....</b>	<b>263</b>

# Presentación

## **Cien números de la revista *Notas de Población*: una publicación tradicional en la región**

*Notas de Población* pone a disposición de sus lectores la edición número 100, dando 42 años de continuidad a la publicación de la revista. Para el Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía (CELADE)-División de Población de la CEPAL y la comunidad de investigadores, estudiantes e interesados en los temas demográficos y de población, esta ocasión constituye una auténtica celebración que nos impulsa a seguir contribuyendo con la difusión del conocimiento acerca de la demografía, particularmente latinoamericana y caribeña, como ha ocurrido desde los primeros números. También es momento propicio para hacer un profundo reconocimiento a todos quienes han participado en la dirección, edición y coordinación de las numerosas tareas que, contra toda vicisitud identificable en el período, demanda la compleja iniciativa de sostener una publicación semestral durante tantos años.

*Notas de Población* es la revista sobre demografía y estudios de población con mayor tradición e historia en América Latina y el Caribe. Consciente de esta situación y del acervo construido, el CELADE-División de Población de la CEPAL ha preservado su continuidad, y el número 100 que hoy presentamos revela los frutos de tal dedicación. En las páginas de nuestra revista han escrito los autores más prolíficos e influyentes, líderes en los ámbitos temáticos de la demografía y los estudios de población, exponentes de un pensamiento de vanguardia, de metodologías innovadoras y de resultados de investigaciones de alta relevancia. La revista ha contribuido, en numerosos frentes y ámbitos temáticos, a la difusión del conocimiento de la evolución de la población en América Latina y el Caribe y sus implicancias en los procesos de desarrollo económico y social de la región. En sus páginas se da testimonio del acompañamiento a las transformaciones asociadas a las transiciones de diversa índole que se observaron en las últimas décadas en el mundo y en la región. Buena parte de las contribuciones que ha realizado esta División a los países han sido plasmadas en la revista, y su propia convergencia con el pensamiento y las propuestas de la CEPAL ha quedado reflejada en sus páginas con los temas que hoy forman parte de la agenda de investigación en materia de población y desarrollo.

Bajo la dirección de Carmen Miró, el CELADE-División de Población de la CEPAL lanzó a la luz la primera edición de esta herramienta innovadora en abril de 1973, en Santiago. El objetivo fue reemplazar al *Boletín Informativo*, que el Centro mantenía desde hacía 12 años, con una publicación de divulgación científica de calidad que se proponía

perdurar conformando un espacio de intercambio de conocimiento. La decisión fue crucial y afortunada, a pesar del contexto político dictatorial que afectó a varios países en esa década y en la siguiente, y que llegó incluso a comprometer los derechos humanos de quienes trabajaban en la publicación. La decisión fue tan acertada que, al cumplir sus primeros diez años de trayectoria, en la presentación del número 31, se celebraba la fuerte influencia que ejercía la revista (entonces con tres números anuales) en ámbitos académicos y se hacían votos por mantener los vínculos con los lectores, situación que se repitió en cada celebración y hoy sigue vigente.

En aquel primer número de 1973, se destacaba una estructura rigurosa que se mantuvo por largos años. Cuatro trabajos componían el cuerpo central del número 1, en el que los autores, con perspectivas disciplinarias diversas y metodologías de la época, analizaban la situación de las ciudades (Ligia Herrera), la mortalidad en el Brasil (Valeria da Motta), el deseo de las mujeres de Costa Rica de no tener más hijos (Johanna de Jong) y las relaciones maritales y la planificación familiar en siete ciudades de la región (Martin Vaessen). La edición, cuidadosamente dirigida entonces por Valdecir Lopes y Rosa María Ortúzar, presentaba tres secciones adicionales: la primera trataba sobre reseñas de investigaciones en ejecución en el Centro; otra exponía temas de actualidad en la forma de noticias e informes de actividades, y la tercera enumeraba las publicaciones recientes del Centro. Esta estructura se mantuvo durante largos años, hasta que la revista fue incorporando, progresivamente, una mayor cantidad de trabajos en cada edición y abriéndose a la difusión de más perspectivas disciplinarias, teóricas y metodológicas que, en algunos artículos, llegaron a abordar problemáticas de otras regiones del mundo.

Transcurrido el tiempo, la revista *Notas de Población* sobresale entre las publicaciones científicas y académicas sobre demografía y estudios de población a nivel mundial, y en esto han confluído varios factores. Entre ellos, mencionamos los siguientes:

- i) En primer lugar, la pionera aparición de la revista en la región le confiere una singularidad, pues surgió en una época en que los cambios demográficos se desplegaban con plena intensidad y congregaban recursos, inquietudes y desafíos que se recogían en el carácter de los trabajos reunidos, algunos de corte metodológico y otros alineados con los tres grandes eventos mundiales sobre población que se realizaron a contar de 1974.
- ii) En segundo lugar, *Notas de Población* ha destacado por aportar de manera sustantiva a la agenda de investigación sobre población y desarrollo, manteniendo su vigencia como espacio de encuentro y de debate en ámbitos que suelen dar lugar a diferentes interpretaciones o que favorecen el consenso, recogiendo la diversidad temática y metodológica, y un riguroso acopio de investigaciones que congregan a autores de diversas generaciones, todos con el común denominador de reconocer en la revista un espacio de intercambio de alto nivel sobre conocimiento demográfico y estudios de población.

- iii) En tercer lugar, esta publicación ha mantenido un contenido científico, académico y político que forma parte del saber demográfico de la región y que le ha conferido liderazgo en materia de publicaciones sobre población y de las revistas científicas en general. Muchos investigadores, ya sea del CELADE-División de Población de la CEPAL o de instituciones externas, han aportado trabajos en los que se promueven asuntos que requieren difusión, se ofrecen metodologías para abordarlos y reflexiones sobre su naturaleza y consecuencias, y se incorporan perspectivas novedosas sobre los procesos de cambio de la población.
- iv) En cuarto lugar, la revista ha mantenido un catálogo de trabajos que reúne contribuciones afines a cada época. Estas abarcan desde la generación de información, la medición, estimación y proyección de las variables demográficas, el análisis de consecuencias y la evaluación de los datos hasta la introducción de temas que en cada momento se consideraron emergentes, como las perspectivas de género, étnica y de derechos. Junto con ello, ha habido temas persistentes que hoy siguen siendo de plena actualidad, como las políticas de población. Lo singular es que esta tradición se ha forjado en simultánea asociación con las situaciones nacionales representativas de los países.

Por todo lo anterior, actualmente *Notas de Población* es un referente obligado de encuentro y debate, un espacio plural para el análisis, la reflexión y el intercambio multidisciplinario en el campo de la población y el desarrollo, que cabe preservar y seguir alimentando. Esto quedó recogido con ocasión de las celebraciones del cincuentenario del CELADE-División de Población de la CEPAL en 2007, cuando se concluyó que la revista forma parte central de la historia institucional. De hecho, los orígenes del CELADE se remontan a principios de la década de 1950, cuando se toma conciencia de la escasez de conocimientos sobre los asuntos de población. En el contexto de las grandes transformaciones que experimentaban los países de América Latina —como la expansión de la tasa de crecimiento demográfico—, la carencia de recursos humanos calificados en la materia y de censos realizados con regularidad eran manifestación de las debilidades del conocimiento científico de la región en este ámbito. No es de extrañar entonces que el Centro se convirtiera tempranamente en una institución pionera de enorme valor y gran utilidad para los países latinoamericanos y caribeños en la difusión del saber demográfico, tanto teórico como metodológico, a través de herramientas como *Notas de Población*.

A 100 números de la primera edición de *Notas de Población* y ante la proximidad del sexagésimo aniversario del CELADE-División de Población de la CEPAL, podemos decir que esta institución, por medio de su revista, realiza aportes al conocimiento y el pensamiento demográficos que trascienden hoy largamente los confines de la región.

En esta edición número 100, *Notas de Población* publica nueve artículos que ofrecen diversas aproximaciones temáticas.

Los tres primeros artículos se refieren a aspectos de fecundidad y reproducción humana. En uno se analizan las diferencias entre la fecundidad deseada y la fecundidad

real observada a través de datos de una encuesta realizada en Montevideo y su Área Metropolitana, así como las variables asociadas a ese diferencial reproductivo. El segundo artículo se refiere también al Uruguay, pero en este caso se utiliza la información recabada en el censo de 2011 sobre el año de nacimiento del primer hijo de las mujeres con al menos un hijo nacido vivo, para determinar, a través de un análisis de cohortes, los cambios de la edad al primer hijo y comparar los resultados con la experiencia internacional en relación con la postergación de la maternidad. En el tercer trabajo se examinan los cambios del comportamiento reproductivo en el Brasil con la información proveniente de las encuestas nacionales, con el fin de identificar las diferencias existentes en términos de los niveles y características reproductivas de las mujeres y caracterizar los procesos de difusión de los derechos reproductivos con una perspectiva de desigualdad social, así como la actual vinculación entre los derechos reproductivos y las políticas públicas.

Un cuarto artículo enfatiza el papel de la migración internacional en la dinámica demográfica actual y su importancia en la configuración de un sistema de reproducción mundial al articular e integrar las dinámicas, estructuras y condiciones demográficas, tanto de las sociedades de origen como de las de destino. Posteriormente, se presenta un trabajo que contiene una reflexión vinculada al debate iniciado en el trabajo previo, señalándose el papel de la movilidad humana y los procesos sociales que la caracterizan, para comprender las fronteras, más allá de una interpretación basada únicamente en los criterios político-administrativos y en la visión de una ocupación poblacional estática.

En el sexto artículo se utilizan microdatos del censo de 2005 de Colombia para analizar, a través de un modelo multinivel, la propensión a cohabitar de las mujeres de 25 a 29 años de edad, y se estudia su relación con algunas variables individuales y con ciertas características a nivel municipal.

En el siguiente artículo, referido a las regiones del Estado Plurinacional de Bolivia, se hace uso de un enfoque bayesiano para estudiar la vulnerabilidad de la población a riesgos de sequías e inundaciones, con el fin de identificar algunos factores físicos y socioeconómicos asociados a esa condición.

En el octavo artículo de este número, dos especialistas evalúan, considerando la más reciente información disponible sobre América Latina y el Caribe, con qué se cuenta y de qué se carece en materia de captación y medición de la discapacidad por medio de las fuentes de información sociodemográfica, en particular, de los censos. Se destaca en la investigación la complejidad del problema y la dificultad para visibilizar a las personas con discapacidad en nuestra región.

Finalmente, se incluye el análisis del cuidado, un tema que, a raíz del envejecimiento demográfico en el mundo, se considera de la mayor relevancia, dadas las implicaciones que tiene en el conjunto de las familias y de la sociedad. El análisis se realiza mediante la comparación de las condiciones del alojamiento y la estructura actual de los hogares donde residen las personas mayores en tres países de América Latina (Argentina, Brasil y México) y en España.

---

# Una aproximación bayesiana a la medición de la vulnerabilidad poblacional a desastres naturales: estudio de caso para el Estado Plurinacional de Bolivia<sup>1</sup>

Rolando Gonzales Martínez<sup>2</sup>

Recibido: 19/01/2015

Aceptado: 25/02/2015

## Resumen

En este artículo se explica el empleo de un enfoque bayesiano para medir la vulnerabilidad de una población a desastres naturales utilizando información climática, censal y administrativa. La aproximación bayesiana permite clasificar las regiones de acuerdo con su vulnerabilidad e identificar los factores físicos y socioeconómicos que hacen que una población sea más o menos vulnerable a una amenaza específica. Estos resultados son útiles para formular políticas de prevención de riesgos focalizadas en las regiones más vulnerables y en función de las características socioeconómicas más importantes de cada población. Se presenta un estudio de caso de la vulnerabilidad poblacional a sequías e inundaciones en el Estado Plurinacional de Bolivia.

**Palabras clave:** Vulnerabilidad a desastres, indicadores, amenazas, análisis factorial, métodos bayesianos.

<sup>1</sup> Este documento se preparó en el contexto del proyecto Vulnerabilidad Poblacional a Riesgo de Desastres en Bolivia, realizado conjuntamente entre el Fondo de Población de las Naciones Unidas (UNFPA) y el Ministerio de Planificación del Desarrollo del Estado Plurinacional de Bolivia.

<sup>2</sup> Economista de la Unidad de Análisis de Políticas Sociales y Económicas (UDAPE) del Ministerio de Planificación del Desarrollo del Estado Plurinacional de Bolivia. Correo electrónico: rgonzales@udape.gob.bo.

## Abstract

This article explains the use of a bayesian approach to measure a population's exposure to natural disasters using climate, census and administrative data. It enables regions to be classified by vulnerability, and physical and socioeconomic factors to be identified that make a population less or more vulnerable to a specific threat. These results are useful for formulating risk-prevention policies that target the most vulnerable regions and are based on each population's most important socioeconomic characteristics. A case study is presented regarding a population's vulnerability to droughts and floods in the Plurinational State of Bolivia.

**Keywords:** vulnerability to disasters, indicators, threats, factor analysis, bayesian methods.

## Résumé

Cet article explique l'utilisation d'une approche bayésienne pour mesurer la vulnérabilité d'une population face aux catastrophes naturelles, sur la base d'une information climatique, censitaire et administrative. L'approche bayésienne permet de classifier les régions en fonction de leur vulnérabilité et de définir les facteurs physiques et socio-économiques qui font qu'une population soit plus ou moins vulnérable à une menace spécifique. Ces résultats aident à la formulation de politiques de prévention des risques ciblées sur les régions les plus vulnérables et qui tiennent compte des principales caractéristiques socio-économiques de chaque population. Une étude de cas est présentée sur la vulnérabilité de la population aux sécheresses et aux inondations dans l'État plurinational de Bolivie.

**Mots clés:** Vulnérabilité aux catastrophes, indicateurs, menaces, analyse factorielle, méthodes bayésiennes

## Introducción

Los desastres naturales provocados por eventos climatológicos extremos afectan a una población provocando muertes y generando pérdidas y daños materiales, económicos y ambientales (UNISDR, 2009). Estos eventos climatológicos extremos afectan de forma diferente a poblaciones con características distintas, de manera que existen poblaciones que son más vulnerables que otras a amenazas naturales.

Debido a que las poblaciones más vulnerables afrontan mayores pérdidas y daños en caso de desastre, es necesario identificar y medir objetivamente el grado de vulnerabilidad de una población y los factores que originan esa vulnerabilidad. Esa información puede influir en la percepción de riesgo de los representantes de los gobiernos nacionales y subnacionales hasta el punto de que se decida integrar la gestión del riesgo en la planificación local y se adopten acciones focalizadas con el fin de reducir la vulnerabilidad, particularmente en las poblaciones con baja capacidad económica para afrontar las tareas de reposición y reconstrucción después de desastres. Asimismo, la identificación de las poblaciones vulnerables permite orientar los recursos de ayuda humanitaria de la cooperación internacional y contar con indicadores sobre los que evaluar esa intervención (Birkmann, 2007).

En este estudio se proporciona una metodología bayesiana para la medición cuantitativa de la vulnerabilidad poblacional a amenazas naturales<sup>3</sup>. Los métodos propuestos permiten: i) clasificar regiones según su vulnerabilidad, ii) identificar los factores físicos y socioeconómicos que hacen a una población más o menos vulnerable a una amenaza específica, y iii) resumir en pocos factores de vulnerabilidad un gran número de variables sociales y físicas que describen las características de una población, facilitando así la comprensión de la vulnerabilidad y la comparación entre diferentes unidades de análisis y entre distintos tipos de amenazas a nivel regional.

En la siguiente sección se describe brevemente la concepción de vulnerabilidad a amenazas en que se basa el estudio. La metodología de medición de vulnerabilidad se describe en la sección 3. En la sección 4 se muestra una aplicación para medir la vulnerabilidad poblacional a sequías e inundaciones en el Estado Plurinacional de Bolivia. Por último, en la sección 5 se discuten los resultados y se presentan algunas conclusiones.

<sup>3</sup> La inferencia bayesiana es una tecnología científica moderna basada en el teorema de Bayes que permite combinar la evidencia de los datos con experiencia previa (Efron, 2013). La inferencia bayesiana se empleó para descifrar el código Enigma de Alemania durante la Segunda Guerra Mundial, localizar epicentros de terremotos, encontrar una bomba de hidrógeno perdida, localizar submarinos rusos, demostrar la relación entre el tabaquismo y el cáncer pulmonar, y calcular la probabilidad de sufrir cáncer de mama (véase McGrayne (2011)). Más recientemente, se emplearon métodos bayesianos para encontrar los restos del vuelo Air France AF 447 desaparecido en el océano Atlántico en 2009 y para el desarrollo de sistemas de búsqueda y rescate de naufragos, como el empleado en el caso de John Aldridge, que en julio de 2013 cayó de un barco a 40 millas de la costa y fue rescatado después de estar 12 horas flotando en el océano Atlántico (véase Klarreich (2014)).

## A. Vulnerabilidad poblacional a amenazas naturales

Según Cardona (2001), la vulnerabilidad y la amenaza son conceptos interrelacionados: para ser vulnerable es necesario estar amenazado, y la condición de amenaza surge de estar expuesto y ser vulnerable a una afectación potencial. Las amenazas son peligros latentes que pueden ocasionar la muerte, o bien lesiones u otros impactos a la salud, así como daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos y daños ambientales. En el contexto de las políticas de reducción del riesgo de desastres impulsadas en el Marco de Acción de Hyogo<sup>4</sup> se considera que las amenazas más relevantes para las poblaciones humanas son las de origen natural y las relacionadas con riesgos ambientales, particularmente las amenazas hidrometeorológicas, como tempestades, granizadas, tornados, tormentas de nieve, inundaciones, heladas o sequías (UNISDR, 2009). Por otro lado, la vulnerabilidad puede definirse como la propensión o predisposición a quedar afectado de forma adversa (IPCC, 2012), es decir, son las características o circunstancias intrínsecas que hacen que una comunidad sujeta a amenazas sea susceptible de sufrir daños o pérdidas como resultado de un desastre. A diferencia de la vulnerabilidad de una persona o de un hogar (Adger, 1999), la vulnerabilidad poblacional es la vulnerabilidad colectiva de quienes habitan una región sujeta a una amenaza específica.

Yarnal (2007) considera que la vulnerabilidad es una función de la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa de una población, por lo que descompone la vulnerabilidad poblacional en vulnerabilidad física y vulnerabilidad social. La vulnerabilidad física resulta de la exposición —determinada por la densidad poblacional, la infraestructura y la actividad económica regional— de una población ante una amenaza natural (Bollin y otros, 2003). La vulnerabilidad social, en cambio, proviene de las características socioeconómicas de la población en una zona expuesta a amenazas; estas características afectan tanto la sensibilidad de las personas a esas amenazas como la capacidad de respuesta y adaptación a los desastres naturales (Yarnal, 2007). Saldaña-Zorilla (2007) y Con y otros (2011) precisan que la vulnerabilidad social guarda relación con la tenencia de activos —entendidos en sentido amplio, lo que incluye tanto activos físicos como capital cultural y social—. Adicionalmente, la vulnerabilidad es heterogénea a nivel espacial (geográfico), ya que poblaciones con diferente vulnerabilidad experimentan distintos niveles de daños y pérdidas, aun si las regiones comparten la misma exposición a desastres (IPCC, 2012).

Las amenazas se miden cuantitativamente atendiendo a la frecuencia de desastres de diversos grados de intensidad registrados históricamente (véase, por ejemplo, Cutter, Mitchell y Scott (2000)). En el caso de la vulnerabilidad, la medición cuantitativa se realiza mediante indicadores adimensionales que agregan con algún procedimiento

<sup>4</sup> El Marco de Acción de Hyogo es un tratado firmado y aprobado en 2005 por 168 Estados Miembros de las Naciones Unidas en la Conferencia Mundial sobre la Reducción de los Desastres que se celebró en Kobe, Hyogo (Japón). El objetivo del tratado fue introducir en las políticas públicas los conceptos de prevención y evaluación de riesgos, así como criterios para enfrentar los desastres y actuar tras una crisis, para aumentar la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres hasta el año 2015.

variables que teóricamente o según la experiencia son importantes para la vulnerabilidad (Cutter, Mitchell y Scott (2000)). Por ejemplo, se suman variables estandarizadas entre cero y uno con objeto de construir un indicador de vulnerabilidad compuesto para Carolina del Sur (Estados Unidos), considerando como variables la población total, el número de hogares, mujeres, residentes no blancos, menores de 18 años y mayores de 65 años, el valor medio de la vivienda y el número de casas móviles. Bollin y otros (2003) propusieron una metodología con la que se categorizan variables continuas que miden la vulnerabilidad (como la densidad demográfica, el número de viviendas en zonas amenazadas y el nivel de pobreza de los hogares) para luego ponderar subjetivamente estas variables categorizadas y agregarlas en un índice comunitario. En Cutter, Boru y Shirley (2003) se presenta uno de los estudios científicamente más rigurosos, en que se emplean técnicas que evitan la ponderación subjetiva de indicadores cuando se mide la vulnerabilidad. Concretamente, se utiliza el análisis factorial para reducir un gran número de variables a un solo factor de vulnerabilidad social a nivel regional para los Estados Unidos. Entre las variables consideradas por Cutter, Boru y Shirley (2003) destacan el estatus socioeconómico, el género, la etnia, la edad, los niveles de desarrollo comercial, empleo, ruralidad, infraestructura y educación, y datos sobre la población con necesidades especiales. En Cardona (2010) se discuten y comparan diferentes técnicas para la generación de indicadores de vulnerabilidad agregados, como la regresión lineal múltiple, los análisis de componentes principales, factorial de frontera eficiente, de la opinión de expertos y de la opinión pública. Con estas técnicas, Cardona (2010) construye un índice de vulnerabilidad para 12 países de América Latina y el Caribe. Rygel, O'Sullivan y Yarnal (2006) usan el análisis de componentes principales para agregar 57 variables en componentes de vulnerabilidad para Hampton Roads, Virginia (Estados Unidos). Con y otros (2011) utilizan ponderadores elegidos subjetivamente para agregar en un solo indicador variables que son determinantes para la vulnerabilidad a nivel de los hogares en la Argentina. Los hogares en los que hay jubilados reciben una alta ponderación en este estudio.

Se llevaron a cabo además dos proyectos para medir la vulnerabilidad a nivel global: el índice de riesgo de desastres (IRD) de las Naciones Unidas (PNUD, 2004) y el proyecto Hotspots de la Universidad de Columbia (Dilley, 2006). En el proyecto del PNUD (2004) sobre el IRD se mide la vulnerabilidad como la relación entre la mortalidad causada por eventos climatológicos extremos respecto al total de la población expuesta en zonas amenazadas, y se utiliza la regresión múltiple para identificar qué variables son determinantes para esa vulnerabilidad. En PNUD (2004) se observa que los países más vulnerables se caracterizan por un producto per cápita bajo y una alta densidad poblacional. Por otra parte, en el proyecto Hotspots no se mide explícitamente la vulnerabilidad, pero para el cálculo de los riesgos a nivel global se emplea información de las pérdidas económicas y humanas causadas por desastres, es decir, la vulnerabilidad revelada de una nación. Véase en Birkmann (2007) un análisis exhaustivo y crítico de estos proyectos.

## B. Metodología

En este estudio, que sigue la línea de las investigaciones más rigurosas sobre vulnerabilidad, se emplea el análisis factorial para agregar en un solo indicador un gran número de variables que caracterizan a una población vulnerable. Se utiliza la descomposición de varianza de estos factores para identificar la contribución de esas variables a la vulnerabilidad.

Con el análisis factorial se evita la asignación de ponderaciones subjetivas que pueden sesgar los resultados cuando se construye un indicador de vulnerabilidad agregado. El empleo de métodos bayesianos (como el análisis factorial bayesiano) tiene la ventaja adicional de que es posible (aunque no imprescindible) incluir una evaluación cualitativa de la vulnerabilidad (a través de la opinión pública o de expertos) en la ponderación cuantitativa de las variables que la caracterizan. A través del teorema de Bayes esa evaluación cualitativa *a priori* se combina rigurosamente con la información que aportan los datos para construir ponderadores que tomen en cuenta ambas fuentes de información.

Sea  $n_r \subseteq N$  las  $n_r$  regiones sujetas a una amenaza, que forman un subconjunto del total de regiones,  $N$ . Si se agrupa la información relevante para medir la vulnerabilidad poblacional en una matriz  $\mathbf{X}$   $n_r \times p$  con  $p$  variables que pueden ser determinantes para la vulnerabilidad,

$$\mathbf{X}_{(n_r \times p)} = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{p1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n_r,1} & \dots & X_{n_r,p} \end{bmatrix},$$

puede utilizarse el análisis factorial para resumir esta información en factores de vulnerabilidad poblacional  $\mathbf{f}_i$  para cada región  $i=1, \dots, n_r$ , con el modelo lineal

$$x_i = \Lambda' \mathbf{f}_i + \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, n_r,$$

en que  $\Lambda$  es una matriz de ponderadores  $m \times p$  que asignan un peso (importancia) para la vulnerabilidad a cada variable del conjunto de datos  $\mathbf{x}_i$ , mientras que  $\epsilon_i$  es un término que resume el efecto agregado de otras variables que afectan la vulnerabilidad de cada región  $i$  pero que no son observables y no forman parte del conjunto de datos.

### 1. Estimadores del factor de vulnerabilidad poblacional agregado

El factor de vulnerabilidad poblacional compuesto se calcula con la densidad de probabilidad conjunta *a priori*  $\pi(\Lambda, \mathbf{F}, \Psi, m)$ ,

$$\pi(\Lambda, \mathbf{F}, \Psi, m) = \pi_1(\Lambda | \Psi, m) \pi_2(\Psi) \pi_3(\mathbf{F} | m) \pi_4(m),$$

en tanto que la evaluación cualitativa *a priori* sobre la importancia de las variables  $x_i$  para la vulnerabilidad se realiza a través de la densidad  $\pi_1(\Lambda|\Psi, m)$ . Por el teorema de Bayes,

$$\pi(\Lambda, F, \Psi, m|X) \propto \mathcal{L}(X|\Lambda, F, \Psi, m)\pi(\Lambda, F, \Psi, m),$$

el factor de vulnerabilidad poblacional agregado que considera ambas fuentes de información estará definido por la densidad *a posteriori*,

$$\pi(F|X, m) \propto \frac{1}{|A + (F - \hat{F})'G(F - \hat{F})|^{\frac{\gamma - m}{2}}},$$

Un estimador de Bayes puntual del factor agregado de vulnerabilidad poblacional será la variable modal  $\hat{f}$ ,

$$\hat{f} = \{I_n - X(B + X'X + \Lambda'_0 H \Lambda_0)^{-1} X'\}^{-1} X(B + X'X + \Lambda'_0 H \Lambda_0)^{-1} \Lambda'_0 H,$$

que es un estimador de Bayes MPP (máxima probabilidad *a posteriori*) de la vulnerabilidad poblacional compuesta. Véanse Ando (2009) y Held y Bové (2013).

## 2. Incertidumbre sobre las variables que son determinantes para la vulnerabilidad poblacional

La incertidumbre sobre qué variables son determinantes para la vulnerabilidad es equivalente a la incertidumbre sobre qué variables se deben incluir en el modelo factorial de vulnerabilidad. Esta incertidumbre puede resolverse si se estiman modelos de vulnerabilidad con diferentes variables y luego se promedian los resultados, ponderados por la probabilidad de que sean correctos, usando promedios de modelo bayesiano (Bayesian Model Averaging, BMA). Se puede obtener un estimador BMA puntual del factor de vulnerabilidad poblacional ( $\hat{f}_r^{BMA}$ ) promediando los factores compuestos  $\hat{f}_{j,r}$  por la probabilidad de que sean correctos,

$$\begin{aligned} \hat{f}_r^{BMA} &= E(f_r|X), \\ &\propto \sum_A P(M_j|X)\hat{f}_{j,r}, \end{aligned}$$

siendo  $P(M_j|X)$  la probabilidad de que cada modelo factorial sea correcto.

### 3. Contribución a la vulnerabilidad poblacional agregada

La contribución de cada variable a la vulnerabilidad puede identificarse con la descomposición de varianza del estimador  $\hat{f}_r^{BMA}$  respecto a las variables contenidas en  $\mathbf{X}$ . La contribución de cada variable a la vulnerabilidad ( $\gamma$ ) se obtendrá con el vector

$$\gamma = \sigma_f^{-2} \mathbf{S}1 / 1' \sigma_f^{-2} \mathbf{S}1.$$

Donde  $\sigma_f^{-2}$  es la varianza total inversa del factor de vulnerabilidad y 1 es un vector unitario de tamaño  $(p+1) \times 1$ .

### 4. Identificación de municipios vulnerables

Los fractiles del factor de vulnerabilidad compuesto  $\hat{f}_r^{BMA}$  permiten clasificar las regiones de acuerdo con su grado de vulnerabilidad, considerándose que si el indicador de vulnerabilidad poblacional de una región es superior a un cuantil  $Q(p)$ , para  $p > 0,5$ , esa región será vulnerable a los desastres producidos por amenazas naturales.

Véase el anexo A1 para obtener información detallada sobre la metodología.

## C. Aplicación

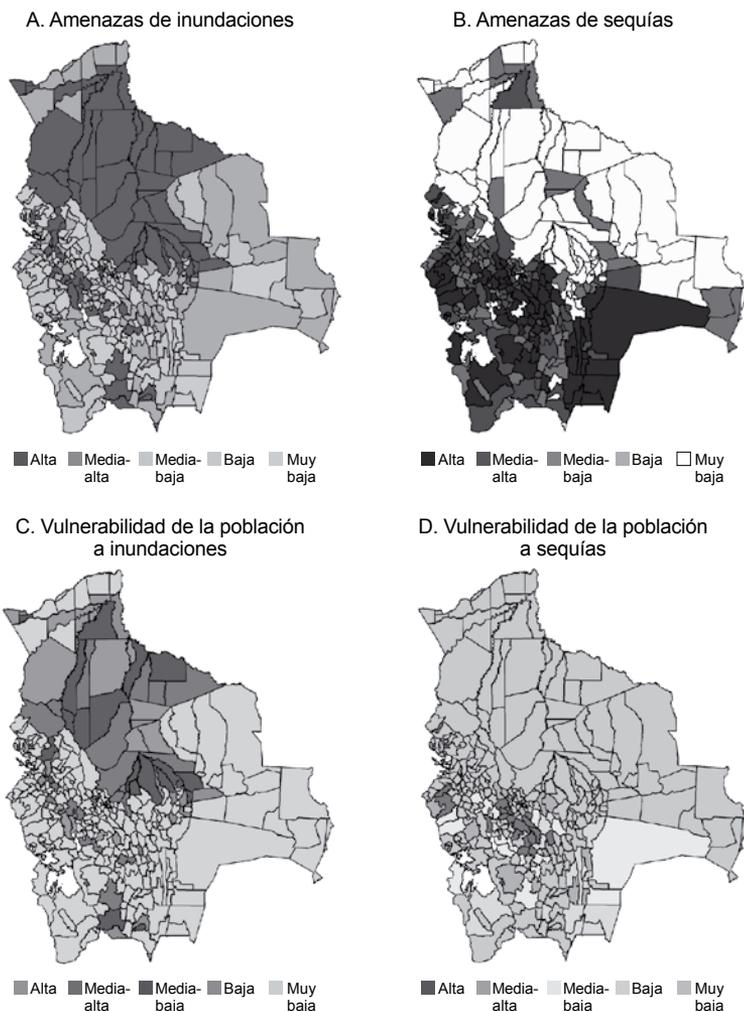
En esta sección se muestra una aplicación de la metodología con información sobre el Estado Plurinacional de Bolivia. Se emplearon datos del Banco Mundial/GFDRR (2014) para identificar las regiones bolivianas sujetas a amenazas naturales e información administrativa y del Censo Nacional de Población y Vivienda 2012 del Estado Plurinacional de Bolivia para medir las características poblacionales y habitacionales de las regiones amenazadas.

### 1. Regiones con una alta amenaza de inundaciones y sequías

En los mapas 1A y 1B se muestra el índice elaborado por Banco Mundial/GFDRR (2014) para medir amenazas de inundaciones y sequías, respectivamente. El índice de amenaza de inundaciones se elaboró con datos del Sistema Nacional de Información para el Ordenamiento Territorial del Estado Plurinacional de Bolivia, tomando en cuenta variables como la intensidad de las precipitaciones, el drenaje (la escorrentía superficial), los atributos del paisaje y los caudales de los ríos y sus tributarios, que llegan a llanuras y depresiones. El índice de amenaza de sequía se calcula a partir de información sobre la aridez de las regiones climáticas y la ausencia o disminución de precipitaciones. La metodología de cálculo del índice de amenazas se describe en Banco Mundial/GFDRR (2014). Se observa que las amenazas de inundaciones se concentran principalmente en el norte del Estado Plurinacional de Bolivia, mientras que las amenazas de sequías se concentran en el sur del país.

Mapa 1

### Estado Plurinacional de Bolivia: amenazas de inundaciones y sequías y vulnerabilidad de la población, 2012



**Fuente:** Elaboración propia, sobre la base de información del indicador de amenazas del Banco Mundial (IABM) y el indicador bayesiano de vulnerabilidad poblacional (IBVP).

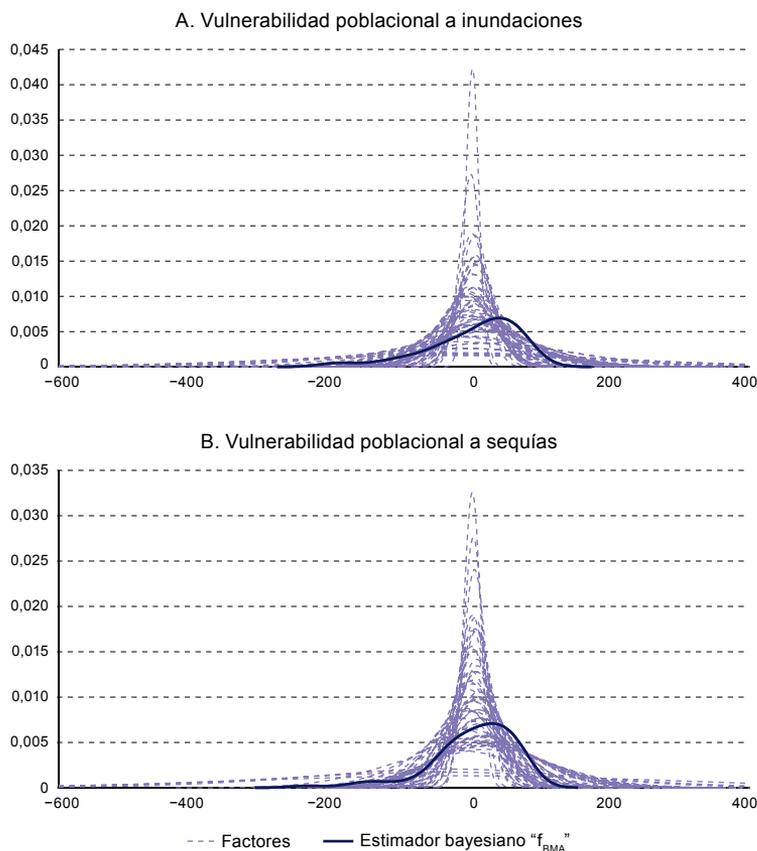
## 2. Vulnerabilidad de la población a inundaciones y sequías

En los mapas 1C y 1D se muestran las vulnerabilidades de la población boliviana a inundaciones y sequías, respectivamente, calculadas según la metodología de medición de vulnerabilidad descrita en la sección anterior. La representación en el mapa se realizó después de calcular el indicador bayesiano de vulnerabilidad poblacional (IBVP) con el estimador  $f^{BMA}$  y de clasificar las regiones de acuerdo con su vulnerabilidad. Para obtener el IBVP se realizó lo siguiente:

- Se limitó el número de municipios analizados a los que se encontraban sujetos a una amenaza de inundación o sequía (debido a que la vulnerabilidad obedece a una amenaza específica).
- Se utilizó el estimador bayesiano  $\hat{f}^{BMA}$  para sintetizar la información censal y administrativa en seis factores latentes de vulnerabilidad: exposición, requerimiento de asistencia, condiciones de vida, infraestructura, diferencias entre grupos sociales e información para prevención (véase el gráfico A2.1 del anexo 2). Debido a la incertidumbre sobre qué variables se debían incluir en cada factor, se estimaron todas las posibles combinaciones de variables; el factor latente resultante es el promedio de esas combinaciones, ponderadas por la probabilidad de que sean correctas.
- Se emplearon los factores latentes de vulnerabilidad para calcular el IBVP (véase el gráfico 1) y descomponer la contribución de cada variable o factor a la vulnerabilidad.

Gráfico 1

### Estado Plurinacional de Bolivia: indicador bayesiano de vulnerabilidad poblacional a inundaciones y sequías, 2012



**Fuente:** Elaboración propia, sobre la base de información del Censo Nacional de Población y Vivienda del Estado Plurinacional de Bolivia, 2012.

El uso de métodos bayesianos permitió asignar *a priori* una importancia específica a los factores que conforman la vulnerabilidad y luego combinar esa apreciación con los datos: en el gráfico A2.2 del anexo 2 se muestra, por ejemplo, que la densidad de la probabilidad del factor de vulnerabilidad agregado es diferente dependiendo del peso cualitativo que se dé en principio a la vulnerabilidad física o socioeconómica. En este estudio se asignó *a priori* la misma importancia a todas las variables en el momento de construir los factores latentes de vulnerabilidad y el indicador de vulnerabilidad poblacional agregado para el Estado Plurinacional de Bolivia.

### 3. Factores de vulnerabilidad a inundaciones y sequías

Siguiendo el método empleado en Yarnal (2007), el factor de vulnerabilidad física se construyó con variables que miden la exposición de una población a un desastre natural: el porcentaje de la población que realiza actividades agropecuarias, la densidad poblacional y viaria, las viviendas por kilómetro cuadrado y la natalidad (como variable sustitutiva del crecimiento demográfico). El factor de vulnerabilidad socioeconómica es el resultado de variables que miden lo siguiente:

- El requerimiento de asistencia: Se toma como aproximación el porcentaje de población que tiene alguna discapacidad, la tasa de dependencia regional y el porcentaje de adultos mayores y niños en el municipio.
- Las condiciones de vida en la región: Se consideran el porcentaje de viviendas precarias (de adobe, tapial, tabique, quinche, piedra, madera, caña, palma o tronco), el porcentaje de población con educación secundaria, la situación de pobreza medida según el método de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) (véase, entre otros, Hammill (2009)), el acceso financiero y el porcentaje de desempleo municipal.
- La infraestructura: Se tiene en cuenta el número de establecimientos de salud y unidades educativas per cápita en el municipio, que pueden servir como albergues.
- Las diferencias entre grupos sociales: Respecto a la etnia, se realiza una aproximación con variables censales que miden el porcentaje de la población que habla un idioma nativo, aprendió a hablarlo en su niñez o se identifica a sí misma como indígena. En cuanto al género, se considera el porcentaje de hogares de cada municipio en los que una mujer es jefe de hogar.
- La carencia de acceso a información para prevención: Se mide por el número de hogares sin radio, televisor, acceso a Internet o teléfono.

En los cuadros 1 y 2 se muestra que la vulnerabilidad socioeconómica es más relevante que la vulnerabilidad física (es decir, que la exposición) para las poblaciones sujetas a amenazas de sequías e inundaciones en el Estado Plurinacional de Bolivia: la incidencia de la vulnerabilidad socioeconómica en el IBVP es del 77% en el caso de inundaciones y alcanza el 96% en el caso de sequías. Dentro de la vulnerabilidad socioeconómica, el factor latente de las condiciones de vida inadecuadas es el que mayor importancia tiene

para la vulnerabilidad: un 37% en el caso de la vulnerabilidad a inundaciones y un 42% en de la vulnerabilidad a sequías. La precariedad de la vivienda, el acceso financiero y la pobreza son los elementos que más inciden en las condiciones de vida de las poblaciones vulnerables a desastres.

Cuadro 1  
Estado Plurinacional de Bolivia: vulnerabilidad poblacional a inundaciones, 2012

Vulnerabilidad poblacional	Factores latentes de vulnerabilidad	Características físicas y socioeconómicas de la población	
Vulnerabilidad poblacional agregada	Vulnerabilidad física (23%)	Exposición (23%)	Actividades agropecuarias (21,6%)
			Densidad poblacional (17,8%)
			Densidad viaria (19,5%)
			Viviendas por km <sup>2</sup> (41,1%)
			Natalidad (9,3%)
	Vulnerabilidad socioeconómica (77%)	Personas que requieren asistencia (22,5%)	Discapacidad (0,2%)
			Tasa de dependencia (62,8%)
			Adultos mayores (19,3%)
			Niños (17,7%)
		Condiciones de vida insuficientes (36,9%)	Precariedad de la vivienda (18,7%)
			Educación (6,6%)
			Automóvil (16,7%)
	Infraestructura (13,9%)	Pobreza (18,3%)	
Acceso financiero (38,5%)			
	Desempleo (1,2%)		
Diferencias entre grupos sociales (2,9%)	Infraestructura (13,9%)	Establecimientos de salud (59%)	
		Establecimientos de educación (41%)	
		Idioma nativo (28,9%)	
		Idioma nativo en la niñez (28,8%)	
Información para prevención (23,8%)	Diferencias entre grupos sociales (2,9%)	Autoidentificación indígena (25,4%)	
		Jefe de hogar mujer (16,9%)	
		Hogares sin radio (1,8%)	
		Hogares sin televisor (38,2%)	
	Información para prevención (23,8%)	Hogares sin acceso a Internet (25,7%)	
		Hogares sin teléfono (34,3%)	

**Fuente:** Elaboración propia, sobre la base del indicador bayesiano de vulnerabilidad poblacional (IBVP) calculado con información del Censo Nacional de Población y Vivienda del Estado Plurinacional de Bolivia, 2012.

El requerimiento de asistencia de la población es el segundo factor de vulnerabilidad que más influye en el IBVP: el 22% en el caso de las inundaciones y el 19% el de las sequías. Las necesidades se concentran en los grupos etarios de la base y de la cima de la pirámide poblacional. La tasa de dependencia de la población sujeta a amenazas es importante, ya que las regiones más vulnerables son aquellas en las que la población dependiente (personas de entre 0 y 14 años y mayores de 65 años) implica una mayor carga para la población productiva.

Es interesante destacar que las diferencias entre grupos sociales son menos relevantes en el caso de la vulnerabilidad a inundaciones (2,9%) que en el de la vulnerabilidad a sequías (15%). Es posible que este resultado se deba a la heterogeneidad étnica en las regiones bolivianas sujetas a amenazas de sequías, en que la incidencia de la autoidentificación indígena en el factor latente de las diferencias entre grupos sociales es del 32%.

Cuadro 2  
**Estado Plurinacional de Bolivia: vulnerabilidad poblacional a sequías, 2012**

Vulnerabilidad poblacional	Factores latentes de vulnerabilidad	Características físicas y socioeconómicas de la población		
Vulnerabilidad poblacional agregada	Vulnerabilidad física (4%)	Exposición (4%)	Actividades agropecuarias	(25%)
			Densidad poblacional	(35,1%)
			Densidad viaria	(3,3%)
			Viviendas por km <sup>2</sup>	(36%)
			Natalidad	(0,6%)
	Vulnerabilidad socioeconómica (96%)	Personas que requieren asistencia (19,2%)	Discapacidad	(0,1%)
			Tasa de dependencia	(54,7%)
			Adultos mayores	(26,8%)
			Niños	(18,4%)
		Condiciones de vida insuficientes (41,7%)	Precariedad de la vivienda	(15,2%)
			Educación	(8,3%)
			Automóvil	(24%)
			Pobreza	(23%)
			Acceso financiero	(25,6%)
Infraestructura (3%)			Desempleo	(3,9%)
	Establecimientos de salud		(45,4%)	
Diferencias entre grupos sociales (15,1%)		Establecimientos de educación	(54,6%)	
		Idioma nativo	(24,5%)	
		Idioma nativo en la niñez	(23,8%)	
		Autoidentificación indígena	(32,1%)	
Información para prevención (21%)		Jefe de hogar mujer	(19,6%)	
		Hogares sin radio	(0,6%)	
		Hogares sin televisor	(40,7%)	
		Hogares sin acceso a Internet	(19,4%)	
			Hogares sin teléfono	(39,3%)

**Fuente:** Elaboración propia, sobre la base del indicador bayesiano de vulnerabilidad poblacional (IBVP) calculado con información del Censo Nacional de Población y Vivienda del Estado Plurinacional de Bolivia, 2012.

#### 4. Poblaciones vulnerables a inundaciones y sequías

En el cuadro 3 se muestra la vulnerabilidad de las poblaciones del Estado Plurinacional de Bolivia altamente amenazadas con sequías e inundaciones. El índice de amenazas del Banco Mundial (IABM) y el IBVP muestran que la amenaza de inundaciones y la vulnerabilidad poblacional para municipios como San Andrés y Loreto son considerables, mientras que el municipio en que se encuentra la capital de departamento, Trinidad, a pesar de estar seriamente amenazado por inundaciones debido a su localización geográfica, presenta una baja vulnerabilidad poblacional, en virtud de sus mejores condiciones socioeconómicas. Un resultado similar se obtiene con respecto a la amenaza de sequías: municipios altamente amenazados por condiciones hidrometeorológicas adversas como Villamontes y Yacuiba en el departamento de Tarija presentan, sin embargo, una considerable resiliencia a esta amenaza, debido a las condiciones socioeconómicas de la población.

Cuadro 3  
**Estado Plurinacional de Bolivia: vulnerabilidad poblacional a amenazas naturales  
 en los municipios de mayor riesgo <sup>a</sup>, 2012**

Región	Amenaza	Vulnerabilidad	Índice de amenaza del Banco Mundial (IABM)	Índice bayesiano de vulnerabilidad poblacional (IBVP)	
Inundación	Mecapaca (La Paz)	Alta	Media-baja	1,00	0,57
	Chimoré (Cochabamba)	Alta	Media-baja	0,97	0,69
	San Ignacio (Beni)	Alta	Media-alta	0,93	0,77
	San Andrés (Beni)	Alta	Alta	0,91	0,85
	Santa Rosa del Sara (Santa Cruz)	Alta	Media-baja	0,91	0,72
	Okinawa Uno (Santa Cruz)	Alta	Media-baja	0,91	0,56
	Trinidad (Beni)	Alta	Baja	0,85	0,37
	Loreto (Beni)	Alta	Alta	0,82	0,93
	Reyes (Beni)	Alta	Media-baja	0,82	0,72
Sequía	Charagua (Santa Cruz)	Alta	Media-baja	1,00	0,78
	Villamontes (Tarija)	Alta	Baja	1,00	0,26
	Yacuiba (Tarija)	Alta	Baja	1,00	0,18
	Mizque (Cochabamba)	Alta	Media-baja	0,95	0,77
	Machareti (Chuquisaca)	Alta	Media-baja	0,90	0,70
	Pasorapa (Cochabamba)	Alta	Media-baja	0,82	0,79
	Entre Ríos (Tarija)	Alta	Baja	0,82	0,65
	Cuevo (Santa Cruz)	Alta	Baja	0,82	0,65

**Fuente:** Elaboración propia, sobre la base del indicador bayesiano de vulnerabilidad poblacional (IBVP) calculado con información del Censo Nacional de Población y Vivienda del Estado Plurinacional de Bolivia, 2012.

<sup>a</sup> La clasificación de la vulnerabilidad se realizó con los fractiles del IBVP, de manera que se considera alta vulnerabilidad por encima del tercer cuartil; vulnerabilidad media-alta entre el segundo y el tercer cuartil; vulnerabilidad media-baja entre el primer y el segundo cuartil, y baja vulnerabilidad por debajo del primer cuartil.

## D. Discusión

Las características sociales, económicas y físicas de una comunidad pueden ocasionar que aumente o se reduzca el impacto de un desastre natural. Por lo tanto, si se miden apropiadamente estas características para identificar las regiones más vulnerables y los factores que contribuyen a esa vulnerabilidad, resultará más fácil emprender acciones preventivas para reducir las pérdidas humanas y materiales ocasionadas por los desastres. En este estudio se propone una metodología de medición de la vulnerabilidad basada en la descomposición de varianza de factores de vulnerabilidad estimados con métodos bayesianos. El enfoque bayesiano en la construcción de indicadores de vulnerabilidad permite combinar rigurosamente la evaluación cualitativa de la vulnerabilidad con una evaluación cuantitativa basada en variables que miden numéricamente la exposición, la fragilidad socioeconómica y, en general, la falta de resiliencia social de una población.

Se realizó una aplicación sobre la base de información censal y administrativa del Estado Plurinacional de Bolivia. Los resultados mostraron que la metodología propuesta permitía identificar rigurosamente las regiones altamente vulnerables a una amenaza específica, además de determinar qué factores contribuían a la vulnerabilidad. Esa información es útil para focalizar las acciones de prevención de riesgos y las medidas de ayuda humanitaria, ya que permiten implementar políticas que mejoran la resiliencia de las poblaciones e informar a los gobiernos nacionales y subnacionales sobre las características físicas y socioeconómicas regionales que inciden en la vulnerabilidad a amenazas naturales.

En futuros estudios se puede integrar la escala espacial del indicador de vulnerabilidad bayesiano (que mide la heterogeneidad geográfica de la vulnerabilidad) con la escala temporal de la vulnerabilidad, es decir, la evolución dinámica de la vulnerabilidad originada por los cambios socioeconómicos y demográficos de una población y por las modificaciones en el medio ambiente. Desde una perspectiva dinámica, la ocurrencia de desastres puede ocasionar una disminución de recursos disponibles y crear tensiones entre comunidades, dando lugar a presiones migratorias dentro de una región o entre regiones (Schneider y otros, 2007). Esta migración puede llevar a patrones de asentamiento en áreas expuestas, lo que, combinado con riesgos sociodemográficos emergentes (CEPAL, 2002), podría dar lugar al surgimiento de comunidades altamente vulnerables (IPCC, 2012), de forma que se modificara con el tiempo la vulnerabilidad poblacional a desastres naturales.

## Bibliografía

- Adger, W. Neil (1999), "Social vulnerability to climate change and extremes in coastal Vietnam", *World Development*, vol. 27, N° 2.
- Ando, Tomohiro (2009), "Bayesian factor analysis with fat-tailed factors and its exact marginal likelihood", *Journal of Multivariate Analysis*, vol. 100, N° 8.
- Banco Mundial/GFDRR (Fondo Mundial para la Reducción de los Desastres y la Recuperación) (2014), *Metodología para el cálculo del índice de riesgo municipal con datos del Censo 2012*, Ministerio de Planificación del Desarrollo/Ministerio de Medio Ambiente y Agua/Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras/Ministerio de Salud/Ministerio de Educación/Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda/ Ministerio de Defensa.
- Birkmann, Joern (2007), "Risk and vulnerability indicators at different scales: applicability, usefulness and policy implications", *Environmental Hazards*, vol. 7, N° 1.
- Bollin, Christina y otros (2003), "Disaster risk management by communities and local governments", Informe Técnico, Washington, D.C., Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- Cardona, Omar (2010), "Indicators of disaster risk and risk management", Informe Técnico, Washington, D.C., Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- \_\_\_ (2001), "La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Una crítica y una revisión necesaria para la gestión", *Work-Conference on Vulnerability in Disaster Theory and Practice*, Wageningen, Disaster Studies of Wageningen University and Research Center.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2002), *Vulnerabilidad sociodemográfica: viejos y nuevos riesgos para comunidades, hogares y personas. Síntesis y conclusiones* (LC/G.2170(SSES.29/16)), Santiago de Chile.

- Con, Melina y otros (2011), “Índice de vulnerabilidad social (IVS). Documento metodológico”, Informes temáticos de la Dirección de Investigación y Estadística del Ministerio de Educación del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires.
- Cutter, Susan L., Bryan J. Boru y W. Lynn Shirley (2003), “Social vulnerability to environmental hazards”, *Social Science Quarterly*, vol. 84, N° 2.
- Cutter, Susan L., Jerry T. Mitchell y Michael S. Scott (2000), “Revealing the vulnerability of people and places: a case study of Georgetown County, South Carolina”, *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 90, N° 4.
- Dilley, Maxx (2006), “Setting priorities: global patterns of disaster risk”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 364, N° 1845.
- Efron, B. (2013), “Bayes’ Theorem in the 21st Century”, *Science*, N° 340.
- Hammill, Matthew (2009), *Income poverty and unsatisfied basic needs* (LC/MEX/L.949), México, D.F., Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Held, L. y D.S. Bové (2013), *Applied Statistical Inference: Likelihood and Bayes*, Berlín, Springer.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (2012), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, C.B. Field y otros (eds.), Cambridge University Press.
- Klarreich, Erica (2014), “In search of Bayesian inference”, *Communications of the ACM*, vol. 58, N° 1.
- McGrayne, S.B. (2011), *The Theory that Would Not Die: How Bayes’ Rule Cracked the Enigma Code, Hunted Down Russian Submarines, and Emerged Triumphant from Two Centuries of Controversy*, Yale University Press.
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo) (2004), *Reducing Disaster Risk: A challenge for development. A global report*, Nueva York.
- Rygel, Lisa, David O’Sullivan y Brent Yarnal (2006), “A method for constructing a social vulnerability index: an application to hurricane storm surges in a developed country”, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 11, N° 3.
- Saldaña-Zorilla, Sergio O. (2007), “Socio-economic vulnerability to natural disasters in Mexico: rural poor, trade and public response”, *serie Estudios y Perspectivas-sede subregional de la CEPAL en México*, N° 92 (LC/L.2825-P; LC/MEX/L.819), México, D.F., Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Schneider, S.H. y otros (2007), “Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change”, *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry y otros (eds.), Cambridge, Cambridge University Press.
- UNISDR (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres) (2009), *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*, Ginebra.
- Yarnal, Brent (2007), “Vulnerability and all that jazz: Addressing vulnerability in New Orleans after Hurricane Katrina”, *Technology in Society*, vol. 29, N°2.

## Anexo 1

# Análisis factorial bayesiano para determinar la vulnerabilidad poblacional a desastres naturales

Sean  $n_r \subseteq N$  las  $n_r$  regiones sujetas a una amenaza  $r$ , que forman un subconjunto del total de regiones,  $N$ . Si se agrupa la información relevante para medir la vulnerabilidad poblacional en una matriz  $\mathbf{X}$   $n_r \times p$  con  $p$  variables que pueden ser determinantes para la vulnerabilidad,

$$\mathbf{X}_{(n_r \times p)} = \begin{matrix} X_{11} & \dots & X_{p1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n_r 1} & \dots & X_{n_r p} \end{matrix},$$

puede utilizarse el análisis factorial para resumir esta información en factores de vulnerabilidad poblacional  $\mathbf{f}_i$  para cada región  $i = 1, \dots, n_r$  con el modelo lineal

$$x_i = \Lambda' \mathbf{f}_i + \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, n_r,$$

en que  $\Lambda$  es una matriz  $m \times p$  de ponderadores que asignan un peso (importancia) para la vulnerabilidad a cada variable del conjunto de datos  $\mathbf{x}_i$ , y  $\epsilon_i$  es un término que resume el efecto agregado de otras variables que afectan la vulnerabilidad de cada región  $i$ , pero que no son observables y no forman parte del conjunto de datos. Si  $\epsilon_i$  sigue una distribución gaussiana multivariante con un vector de medias igual a cero y una matriz de varianza-covarianza  $\Psi$ ,

$$\epsilon_i \sim N(0, \Psi),$$

la función de verosimilitud del modelo factorial de vulnerabilidad poblacional será

$$\mathcal{L}(\mathbf{X}|\Lambda, \mathbf{F}, \Psi, m) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n_r p}{2}} |\Psi|^{\frac{n_r}{2}}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \text{tr} \{ (\mathbf{X} - \mathbf{F}\Lambda)' (\mathbf{X} - \mathbf{F}\Lambda) \Psi^{-1} \} \right],$$

$$\text{con } \mathbf{X} = (x_1, \dots, x_p)' \text{ y } \mathbf{F} = (f_1, \dots, f_m)'.$$

### 1. Estimadores del factor de vulnerabilidad poblacional agregado

El factor de vulnerabilidad poblacional compuesto se estima con la densidad de probabilidad conjunta *a priori*  $\pi(\Lambda, \mathbf{F}, \Psi, m)$ ,

$$\pi(\Lambda, \mathbf{F}, \Psi, m) = \pi_1(\Lambda|\Psi, m) \pi_2(\Psi) \pi_3(\mathbf{F}|m) \pi_4(m)$$

y las densidades marginales,

$$\begin{aligned}\pi_1(\Lambda|\Psi, m) &= \frac{1}{(2\pi)^{\frac{mp}{2}}} |\Psi|^{-\frac{m}{2}} |\mathbf{H}|^{-\frac{p}{2}} \\ &\quad \times \exp \left[ -\frac{1}{2} \text{tr} \left\{ (\Lambda - \Lambda_0)' \mathbf{H}^{-1} ((\Lambda - \Lambda_0) \Psi^{-1}) \right\} \right], \\ \pi_2(\Psi) &= \frac{1}{2^{\frac{vp}{2}} \Gamma_p \left( \frac{v}{2} \right)} |\mathbf{B}|^{\frac{v}{2}} |\Psi|^{-\frac{(v+p+1)}{2}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \text{tr} (\Psi^{-1} \mathbf{B}) \right\}, \\ \pi_3(\mathbf{F} | m) &= \frac{|\mathbf{H}|^{\frac{\zeta_{n,p,v}-n}{2}} \Gamma_n \left( \frac{\zeta_{n,p,v}}{2} \right)}{\pi^{\frac{mm}{2}} \Gamma \left( \frac{\zeta_{n,p,v}-m}{2} \right)} \times \frac{1}{|\mathbf{H} + \mathbf{F}'\mathbf{F}|^{\zeta_{n,p,v}}}.\end{aligned}$$

Por el Teorema de Bayes,

$$\pi(\Lambda, \mathbf{F}, \Psi, m | X) \propto \mathcal{L}(X | \Lambda, \mathbf{F}, \Psi, m) \pi(\Lambda, \mathbf{F}, \Psi, m),$$

el factor de vulnerabilidad poblacional agregado en que se consideran ambas fuentes de información estará definido por la densidad *a posteriori*,

$$\pi(\mathbf{F} | X, m) \propto \frac{1}{|\mathbf{A} + (\mathbf{F} - \hat{\mathbf{F}})' \mathbf{G} (\mathbf{F} - \hat{\mathbf{F}})|^{\frac{\gamma-m}{2}}},$$

en que

$$\mathbf{A} = \mathbf{H} + \mathbf{H}' \Lambda_0 \mathbf{W}^{-1} \Lambda_0 \mathbf{H} - (\mathbf{X} \Lambda_0' \mathbf{H})' \mathbf{G}^{-1} (\mathbf{X} \mathbf{W}^{-1} \Lambda_0' \mathbf{H}),$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{I}_n - \mathbf{X} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{X}',$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{B} + \mathbf{X}' \mathbf{X} + \Lambda_0' \mathbf{H} \Lambda_0.$$

La importancia *a posteriori* de cada variable para la vulnerabilidad estará definida por la densidad,

$$\pi(\Lambda | X, \mathbf{F}, m) \propto \frac{1}{|\mathbf{R}_F + (\Lambda - \Lambda_F)' \mathbf{Q}_F (\Lambda - \Lambda_F)|^{\frac{\gamma}{2}}},$$

siendo

$$\mathbf{Q}_F = \mathbf{H} + \mathbf{F}'\mathbf{F},$$

$$\mathbf{R}_F = \mathbf{X}'\mathbf{X} + \mathbf{B} + \Lambda_0' \mathbf{H} \Lambda_0 - (\mathbf{X}'\mathbf{F} + \Lambda_0' \mathbf{H}) \mathbf{Q}_F^{-1} (\mathbf{X}'\mathbf{F} + \Lambda_0' \mathbf{H})',$$

$$\Lambda_F = (\mathbf{X}'\mathbf{F} + \Lambda_0' \mathbf{H}) (\mathbf{H} + \mathbf{F}'\mathbf{F})^{-1}.$$

Un estimador de Bayes puntual del factor agregado de vulnerabilidad  $\hat{f}$  es el valor

de  $f$  que minimiza la esperanza de una función de pérdida  $L(\hat{f}, f)$ , en que la esperanza se toma sobre la distribución posterior  $\pi(\mathbf{F}|\mathbf{X}, m)$ .

$$\begin{aligned} \min_{\hat{f}} E[L(\hat{f}, f)|\mathbf{X}, m] &:= \min_{\hat{f}} E[L(\hat{f}, f)], \\ &= \min_{\hat{f}} \int L(\hat{f}, f) \pi(\mathbf{F}|\mathbf{X}, m) df. \end{aligned}$$

Como una función de pérdida asimétrica,

$$L(\hat{f}, f) := \begin{cases} 0, & \text{si } |\hat{f} - f| \leq \eta \\ 1, & \text{si } |\hat{f} - f| > \eta \end{cases},$$

la esperanza posterior resulta

$$\begin{aligned} E[L(\hat{f}, f)] &= \int_{-\infty}^{\hat{f}-\eta} \pi(\mathbf{F}|\mathbf{X}, m) df + \int_{\hat{f}+\eta}^{\infty} \pi(\mathbf{F}|\mathbf{X}, m) df, \\ &= 1 - \int_{\hat{f}-\eta}^{\hat{f}+\eta} \pi(\mathbf{F}|\mathbf{X}, m) df. \end{aligned}$$

Según  $\eta \rightarrow 0$  esta esperanza es aproximadamente igual a  $\int \pi(\mathbf{F}|\mathbf{X}, m) df$ , función que se maximiza con la moda posterior de  $\pi(\mathbf{F}|\mathbf{X}, m)$ , es decir, la variable modal  $\hat{f}$ ,

$$\hat{f} = \left\{ \mathbf{I}_n - \mathbf{X}(\mathbf{B} + \mathbf{X}'\mathbf{X} + \Lambda_0 \mathbf{H} \Lambda_0)^{-1} \mathbf{X}' \right\}^{-1} \mathbf{X}(\mathbf{B} + \mathbf{X}'\mathbf{X} + \Lambda_0' \mathbf{H} \Lambda_0)^{-1} \Lambda_0' \mathbf{H},$$

es un estimador de Bayes puntual MPP (máximo de probabilidad posterior) de la vulnerabilidad poblacional compuesta. Véase Ando (2009) y Held y Bové (2013).

## 2. Incertidumbre sobre las variables que son determinantes para la vulnerabilidad poblacional

Sea  $\hat{f}_{j,r}$  un estimador de Bayes puntual MPP de la vulnerabilidad poblacional compuesta, calculada a partir del modelo  $M_j$ , para una amenaza  $r$ . Dadas  $p$  variables que podrían ser determinantes para la vulnerabilidad de una población, el número total de modelos factoriales de los que debe realizarse una estimación estará dado por la expresión

$$k = \sum_{j=2}^p \binom{p}{j},$$

siendo el coeficiente binomial que mide todas las posibles combinaciones de variables determinantes de la vulnerabilidad

$$\binom{p}{j} = \frac{p!}{j!(p-j)!}.$$

El espacio de todos los posibles modelos factoriales de vulnerabilidad está dado por

$$M = \{M_j : j=1, \dots, k\}.$$

Puede obtenerse un estimador BMA puntual del factor de vulnerabilidad poblacional ( $\hat{f}_r^{BMA}$ ) promediando los factores compuestos  $\hat{f}_{j,r}$  por la probabilidad de que sean correctos,

$$\begin{aligned} \hat{f}_r^{BMA} &= E(f_r | X), \\ &\propto \sum_A P(M_j | X) \hat{f}_{j,r}, \end{aligned}$$

La probabilidad posterior de que cada modelo factorial sea correcto  $P(M_j | X)$  está dada por

$$P(M_j | X) = \frac{\pi(X | M_j)}{\sum_{j=1}^k \pi(X | M_j)},$$

asumiéndose *a priori* que todas las combinaciones de variables tienen la misma probabilidad de ser correctas,

$$P(M_j) = 2^{-\sum_{j=2}^p \frac{p!}{j!(p-j)!}},$$

y siendo la función de verosimilitud marginal exacta de cada modelo factorial de vulnerabilidad poblacional

$$\pi(X | M_j) = \frac{|B|^{\frac{v}{2}} |H|^{\frac{v-2p}{2}}}{\pi^{\frac{n_r p}{2}} |W|^{\frac{\gamma-m}{2}} |G|^{\frac{m}{2}} |A|^{\frac{v}{2}}} \frac{\Gamma_m \left(\frac{\gamma-p}{2}\right) \Gamma_{n_r} \left(\frac{\gamma-m-p}{2}\right) \Gamma_{n_r} \left(\frac{\gamma-2m}{2}\right)}{\Gamma_m \left(\frac{\gamma}{2}\right) \Gamma_{n_r} \left(\frac{\gamma-2m-p}{2}\right) \Gamma_{n_r} \left(\frac{\gamma-m}{2}\right)},$$

### 3. Contribución a la vulnerabilidad poblacional agregada

La contribución de cada variable a la vulnerabilidad puede identificarse con la descomposición de varianza del estimador  $\hat{f}_r^{BMA}$  respecto a las variables contenidas en  $X$ . Sea,

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{2,1}^2 & \cdots & \sigma_{p+1,1}^2 \\ \sigma_{2,1}^2 & \sigma_2^2 & \cdots & \sigma_{p+1,2}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{p+1,1}^2 & \sigma_{p+1,2}^2 & \cdots & \sigma_{p+1,p+1}^2 \end{bmatrix},$$

la matriz de varianza-covarianza de una matriz aumentada,

$$\left[ \hat{f}_r^{BMA} \quad - \sum_{l=1}^p x_l \vdots X \right].$$

Por la Ley de Eve, la varianza total del factor de vulnerabilidad ( $\sigma_f^2$ ) puede descomponerse en la varianza ( $\sigma_v^2$ ) y la covarianza ( $\sigma_c^2$ ),

$$\sigma_f^2 = \sigma_v^2 + 2 \sigma_c^2,$$

$$\sigma_v^2 = 1' \left( \sum_{v=1}^{p+1} E_v \Sigma E_v \right) 1,$$

$$\sigma_c^2 = 1' \left( \sum_{c=1}^{p+1} E_c \Sigma E_c \right) 1,$$

siendo  $E_v$  una matriz en la que los  $v$  elementos que corresponden a la varianza son iguales a 1,  $E_c$  una matriz en la que los  $c$  elementos que corresponden a la covarianza son iguales a 1, y  $1$  un vector unitario de tamaño  $(p + 1) \times 1$ . La contribución de cada variable a la vulnerabilidad ( $\gamma$ ) se obtendrá con el vector

$$\gamma = \sigma_f^{-2} S 1 / 1' \sigma_f^{-2} S 1.$$

### 4. Identificación de municipios vulnerables

Sea  $F: R \rightarrow [0,1]$  la función de distribución acumulada (cdf) empírica del factor de vulnerabilidad compuesto  $\hat{f}_r^{BMA}$ . La función cuantílica,

$$Q(p) = \inf \{ \hat{f}_r^{BMA} \in R : \hat{F}(\hat{f}_r^{BMA}) \geq p \},$$

para una probabilidad  $0 < p < 1$  permite clasificar las regiones de acuerdo con su grado de vulnerabilidad. Si el indicador de vulnerabilidad poblacional de una región es superior a un cuantil  $Q(p)$  para  $p > 0,5$ , esta región será vulnerable a los desastres producidos por amenazas naturales.

## Anexo 2

### Gráficos adicionales

Gráfico A2.1

Estado Plurinacional de Bolivia: factores latentes de vulnerabilidad poblacional, 2012

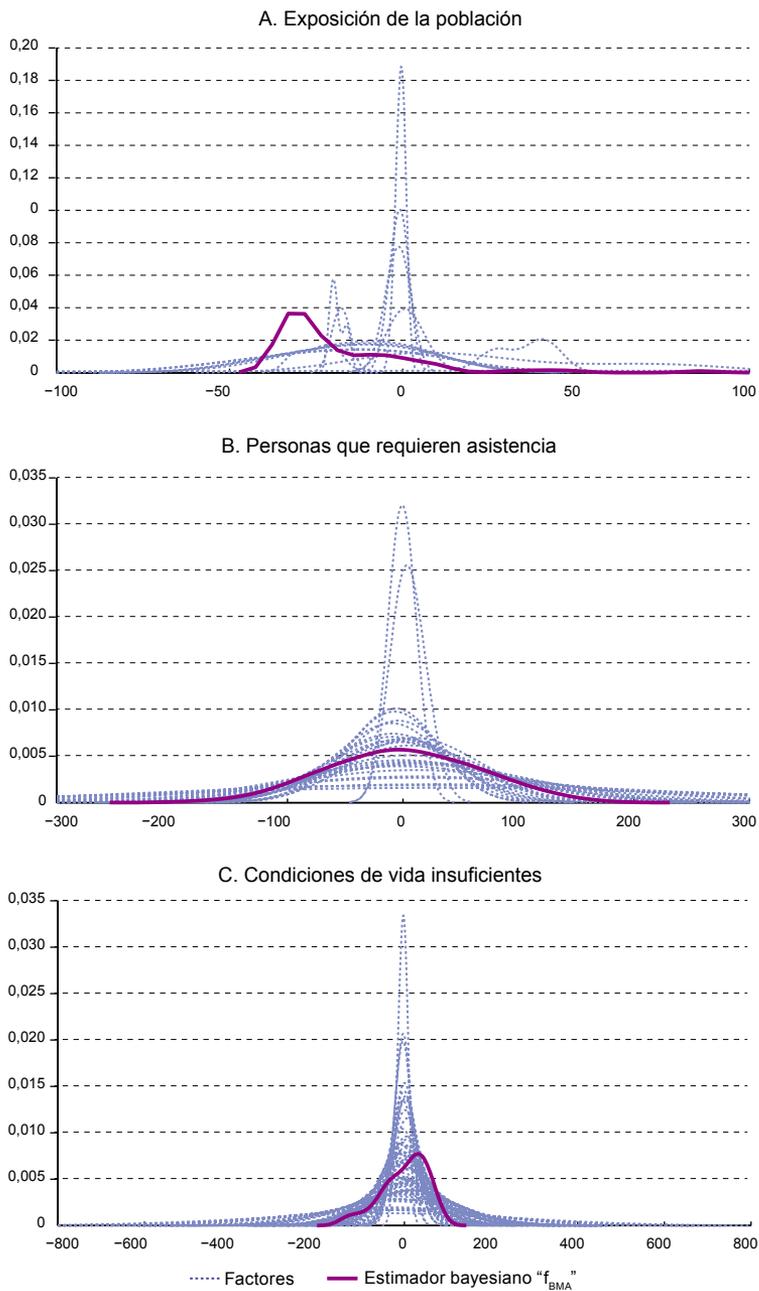
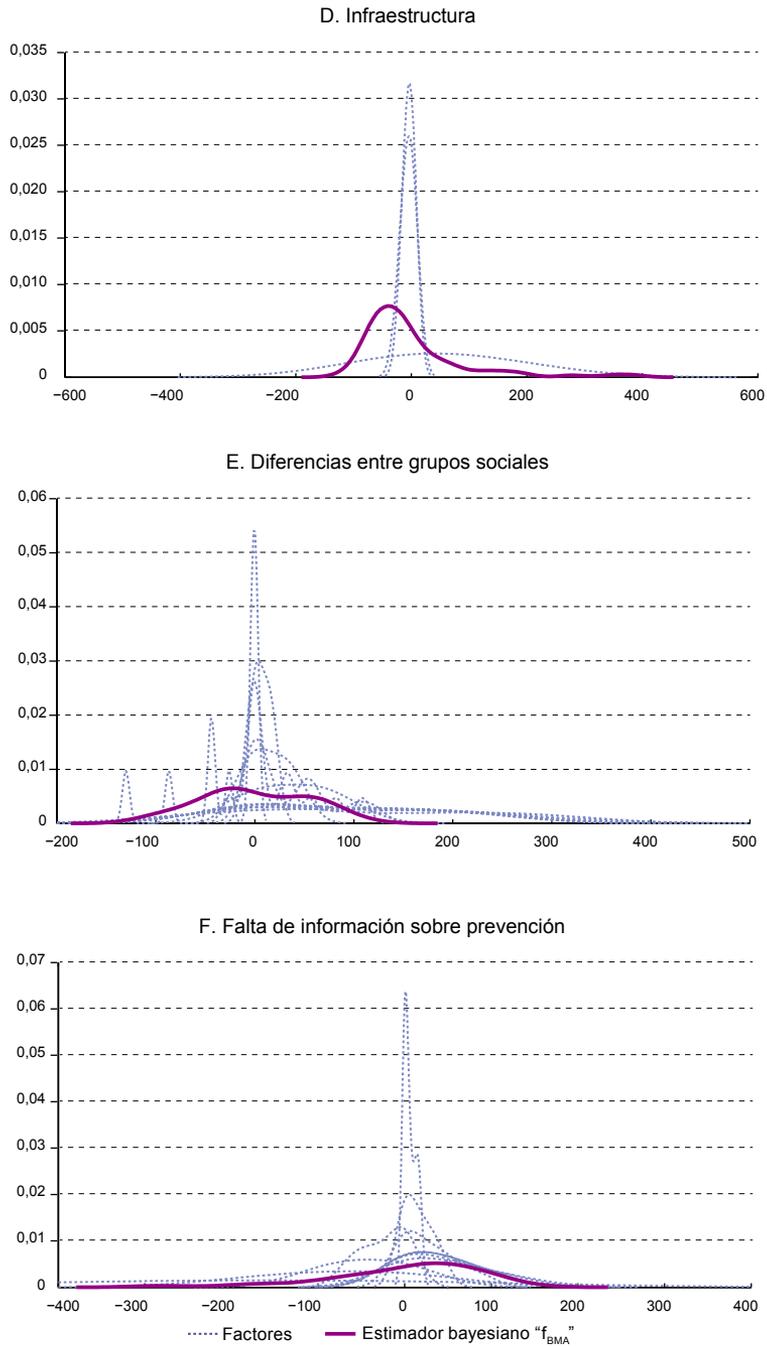
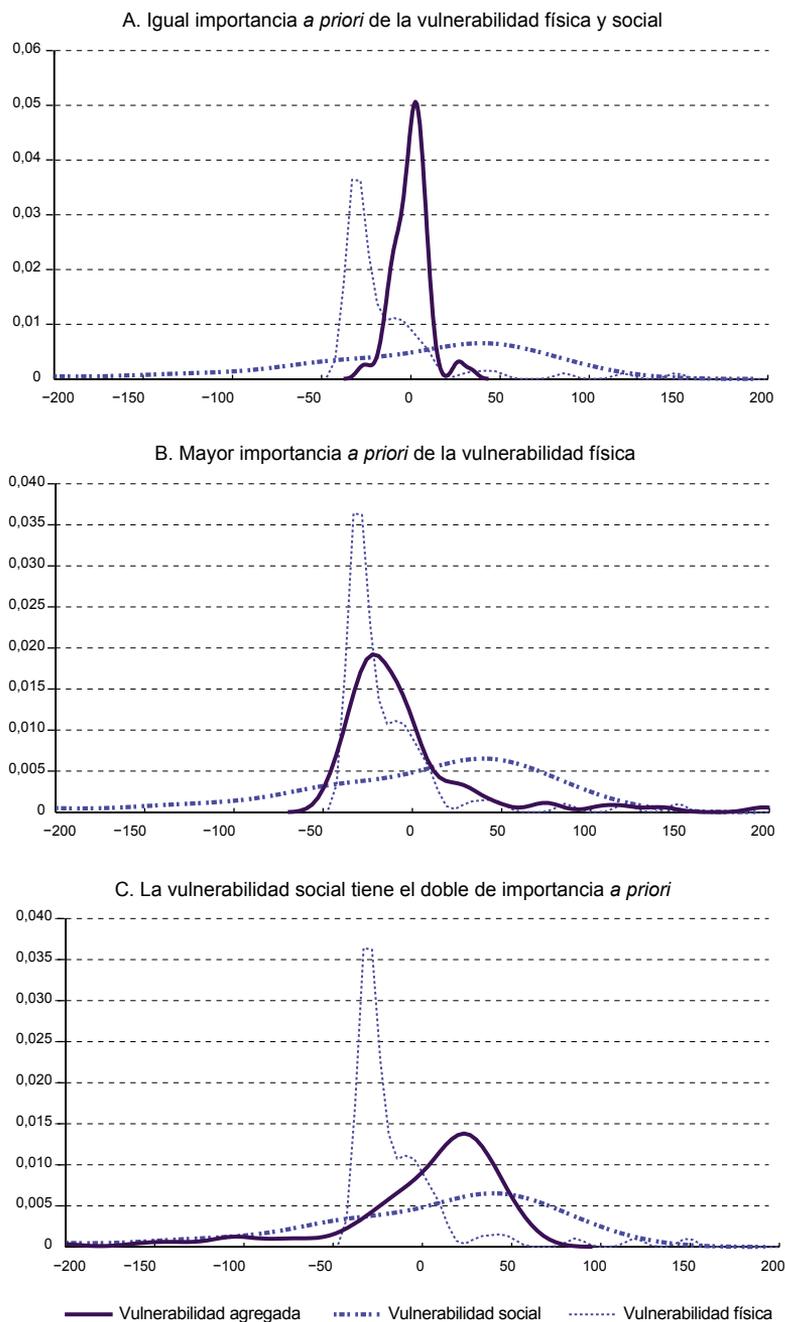


Gráfico A2.1 (conclusión)



**Fuente:** Elaboración propia, sobre la base de información del Censo Nacional de Población y Vivienda del Estado Plurinacional de Bolivia, 2012.

Gráfico A2.2  
**Estado Plurinacional de Bolivia: funciones de densidad de probabilidad de la vulnerabilidad poblacional, 2012**



**Fuente:** Elaboración propia, sobre la base de información del Censo Nacional de Población y Vivienda del Estado Plurinacional de Bolivia, 2012.