

# Luz para las Comunidades de la Chiquitania

Los beneficios de la electrificación rural con energía renovable en Bolivia

Sergio Ballón  
Soraya Román  
Katherine Antonio  
Carlos Foronda  
David López-Soto  
Wilkferg Vanegas  
Michelle Hallack

## Luz para las Comunidades de la Chiquitania

### Los beneficios de la electrificación rural con energía renovable en Bolivia

Sergio Ballón  
Soraya Román  
Katherine M. Antonio  
Carlos Foronda  
David López-Soto  
Wilkferg Vanegas  
Michelle Hallack

Catalogación en la fuente proporcionada por la  
Biblioteca Felipe Herrera del  
Banco Interamericano de Desarrollo

Luz para las comunidades de la Chiquitania: los beneficios de la electrificación rural con energía renovable en Bolivia / Sergio Ballón, Soraya Román, Katherine M. Antonio, Carlos Foronda, David López-Soto, Wilkferg Vanegas, Michelle Hallack.  
p. cm. — (Documento de trabajo del BID ; 1065)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Rural electrification-Bolivia. 2. Renewable energy sources-Bolivia. I. Ballón, Sergio. II. Román, Soraya. III. Antonio, Katherine M. IV. Foronda, Carlos. V. López-Soto, David. VI. Vanegas, Wilkferg. VII. Hallack, Michelle, 1983- VIII. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Energía. XI. Serie. IDB-WP-1065

Códigos JEL: L94, O13, O18, Q40

Palabras clave: energía renovable, acceso a luz eléctrica, evaluación de impacto, electrificación rural

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2019 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Después de un proceso de revisión por pares, y con el consentimiento previo y por escrito del BID, una versión revisada de esta obra podrá reproducirse en cualquier revista académica, incluyendo aquellas referenciadas por la Asociación Americana de Economía a través de EconLit, siempre y cuando se otorgue el reconocimiento respectivo al BID, y el autor o autores no obtengan ingresos de la publicación. Por lo tanto, la restricción a obtener ingresos de dicha publicación sólo se extenderá al autor o autores de la publicación. Con respecto a dicha restricción, en caso de cualquier inconsistencia entre la licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas y estas declaraciones, prevalecerán estas últimas.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.





Fuente: Registro fotográfico BID (2018)

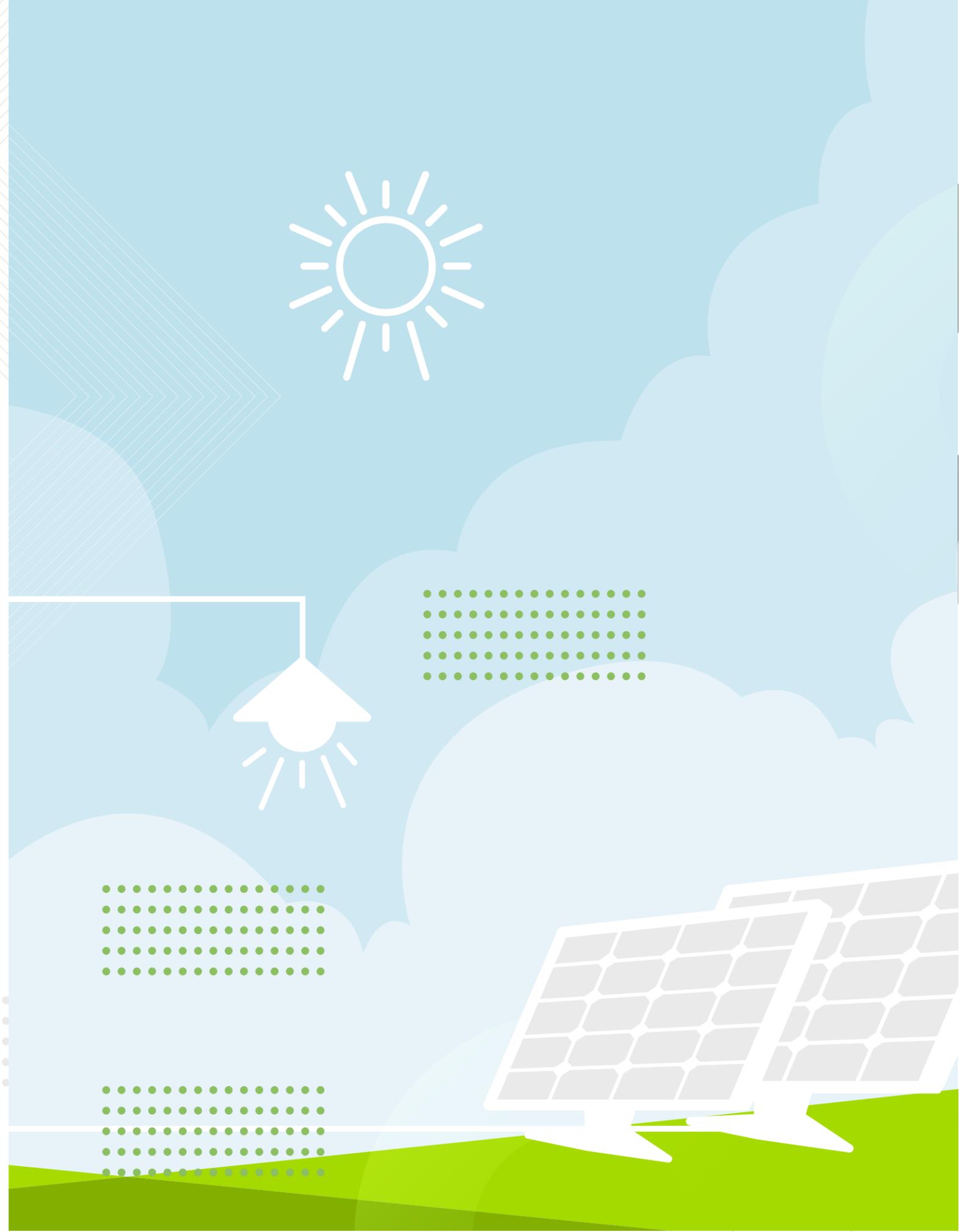
# Resumen.

Este estudio muestra los resultados de la evaluación del programa de sistemas pico fotovoltaicos en hogares sin acceso a electricidad en el departamento de Santa Cruz, Bolivia. El programa analizado consiste en la provisión de paneles solares domiciliarios a comunidades rurales de 9 municipios, que están conectados a una batería la cual distribuye energía eléctrica a dos lámparas LED. El sistema tiene la capacidad de proveer iluminación constante por un mínimo de 5 horas, tiene un punto de iluminación móvil y una salida para cargar celular o radio. Los resultados muestran que la implementación de los sistemas pico fotovoltaicos generan un aumento medio de 4 horas por día de iluminación y ahorro promedio de 80% en los gastos. Este monto es superior al costo de operación, reposición y mantenimiento del sistema fotovoltaico, lo que hace que los beneficios sociales de la intervención sean financieramente sostenibles. Con la instalación del panel solar se observa también una sustitución de fuentes de baja luminosidad por fuentes de luminosidad alta que utilizan energía renovable – las lámparas LED del sistema. Esta sustitución mejora la calidad de iluminación de los hogares y está acompañada de una reducción de emisiones de carbono.



# Contenidos

Resumen.....	5
01. Introducción.....	8
02. Marco metodológico.....	12
2.1. Diseño de la intervención.....	13
2.2. Características de la muestra.....	19
2.3. Estrategia Empírica de Estimación.....	22
03. Efectos del uso de paneles solares en la Chiquitania.....	24
3.1. Horas de uso de fuentes de energía.....	25
3.2. Gasto de iluminación.....	29
3.3. Otras variables socioeconómicas de impacto.....	31
3.4. Impactos ambientales.....	33
04. Conclusiones.....	36
05. Referencias.....	39
06. Anexos.....	42
6.1. Estrategia de estimación e identificación.....	43
6.2. Test de balance muestra completa en línea de base.....	44
6.3. Desgaste y modelo IPW.....	47
6.4. Ajuste del matching para las estimaciones.....	52
6.5. Diferencia de medias en variables de resultado e impacto durante seguimiento.....	53
6.6. Estimación de cantidad de consumo de energía de fuentes tradicionales rurales.....	54
6.7. Estimación de consumo de lúmenes.....	55
6.8. Estimación de otras variables socioeconómicas de impacto.....	58



# Introducción.

En el año 2015, el 97.8% de la población de América Latina y el Caribe contaba con acceso a la electricidad, muy por encima del promedio mundial de 87.3% (SielAC/OLADE y Banco Mundial). Ese mismo año, los países ratificaron, en una resolución aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas, su compromiso de garantizar el acceso universal para el 2030, con un suministro de energía asequible, fiable, sostenible y moderno. Sin embargo, los hogares que todavía no cuentan con acceso al servicio eléctrico se encuentran localizados en zonas rurales, geográficamente remotas o dispersas. Estas características implican que implementar programas de inversión basados en la extensión de redes de transmisión y distribución sea costoso para los gobiernos (Barnes et al. 2018). Para cubrir esta brecha de cobertura eléctrica, los países están aprovechando el avance tecnológico de soluciones descentralizadas, ya que facilitan el acceso a la electricidad de forma continua y a costos más bajos.

Los beneficios asociados al acceso al servicio eléctrico han sido documentados en estudios previos, que analizan los efectos en la salud, educación, recreación y en el empleo, principalmente en zonas rurales (BenYishay y Tunstall, 2011; Chowdhury y Torero, 2006; Khander et al. 2009; Vernet et al. 2019; Grogan y Sadanand, 2013, Mejdalani et al 2018). No obstante, gran parte de estos resultados se basan en políticas de extensión de la red eléctrica. Esto abre espacios en la literatura para evaluaciones de acceso con soluciones descentralizadas como la instalación de paneles solares fotovoltaicos y la construcción de micro redes.

Estudios recientes muestran en general impactos positivos de la electrificación rural a través de paneles solares. Por ejemplo, un experimento aleatorio con sistemas pico fotovoltaicos en Uganda encontró resultados mixtos. Por un

lado, la instalación de este tipo de tecnologías mejoró los estándares de salud y seguridad en hogares. Sin embargo, encontró poca evidencia de mejoras en la educación, cuyo análisis fue medido a través de resultados en exámenes de matemáticas e inglés (Furukawa, 2014). En otros casos, la instalación de sistemas pico fotovoltaicos en zonas rurales está asociada a una disminución del gasto de los hogares, debido a la sustitución de fuentes tradicionales de energía por fuentes modernas y renovables.

En Rwanda, los beneficiarios de este tipo de tecnologías disminuyeron el gasto de baterías y keroseno, además los usuarios reasignaron las horas dentro del hogar y realizaron nuevas actividades en horario vespertino (Grimm et al. 2017). En India (Aklin et al., 2017) los resultados son similares, ya que hubo reducción del gasto en combustibles tradicionales para iluminación. Aklin et al. (2017) encontraron que, en hogares donde se instaló el sistema fotovoltaico, el gasto en kerosene disminuyó y las horas de acceso a la electricidad incrementaron de manera marginal; sin embargo, no se encontró evidencia en cambios en las actividades productivas, ni en la educación.

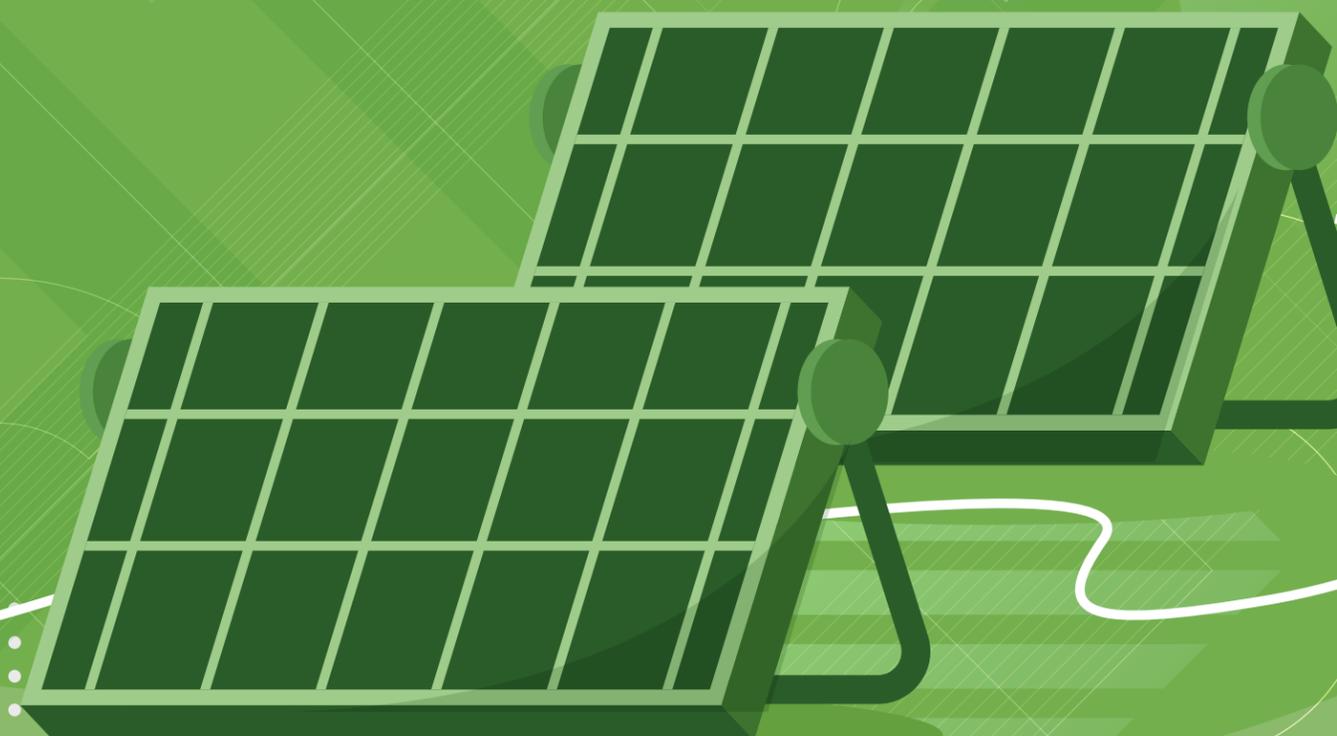
La implementación de este tipo de tecnologías nos invita a repensar los costos y beneficios asociados al acceso a los servicios eléctricos, así como los efectos indirectos en la salud, educación, recreación y empleo. Una mejora en la calidad de vida de las personas no cambia apenas por el impacto directo del servicio, sino que se deriva de una larga cadena de resultados intermedios que interactúan con otros elementos. En ocasiones, aislar el efecto resulta una tarea difícil o que puede generar resultados heterogéneos e inconcluyentes (Hansen et al. 2011). También muchas intervenciones de infraestructura no son ajustables a la aleatorización, ya sea por el número de unidades intervenidas o porque la naturaleza técnica de la intervención impide la

asignación aleatoria -por ejemplo, viviendas con o sin intervención. Además, debe considerarse el componente ético al momento de decidir qué hogares reciben o no acceso al servicio eléctrico.

Este estudio muestra el impacto económico y social de la implementación de sistemas pico fotovoltaicos en **1,566 hogares de áreas rurales del Departamento de Santa Cruz**, Bolivia, que no contaban con acceso a electricidad de ninguna fuente. Este proyecto se desarrolló en el marco del Programa de Electrificación Rural con Energía Renovable (PERER) del Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas de Bolivia. El proyecto se implementó entre los meses de septiembre 2017 y julio 2018, y fue concebido desde su inicio como un experimento aleatorio. En este caso, se definieron dos grupos: 1) el de tratamiento (la instalación de sistemas pico fotovoltaico), que se asignó aleatoriamente a cerca de la mitad de los hogares del área de intervención, y 2) el grupo de control, el resto de los hogares sin sistemas fotovoltaicos.

Se identificaron diferentes efectos de la instalación de estos sistemas. Entre ellos, la sustitución en el uso diario de fuentes de iluminación tradicionales (velas, mecheros, linternas, lámparas a gas) por alternativas (pico-lámparas). Este resultado es consistente con lo descrito en otros proyectos similares (e.g. Barnes (2005), Banco Mundial (2008)). También, se identificó que esta sustitución generó ahorros en los hogares evaluados en cuanto al gasto mensual en fuentes de energía, mostrando la importancia que puede tener el uso de nuevas tecnologías para reducir la pobreza energética en Bolivia, y en la región.

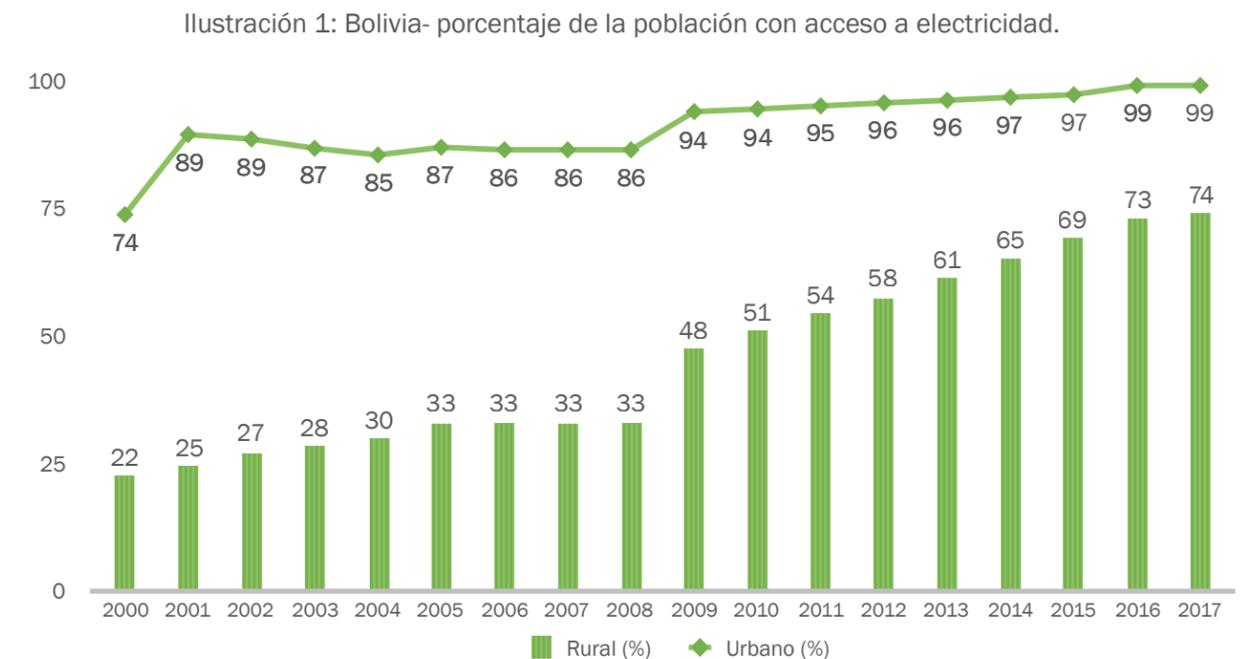
En general, este estudio contribuye a la literatura de dos maneras: complementa evaluaciones previas utilizando sistemas descentralizados, y además constituye la evaluación del primer experimento aleatorio realizado con sistemas pico fotovoltaicos en zonas rurales en Bolivia. Finalmente, este estudio se divide de la siguiente manera: la sección 2 presenta el diseño de la intervención y la descripción de la muestra, la sección 3 muestra la estrategia empírica de estimación, la sección 4 muestra los resultados y finalmente se presentan las conclusiones.



# Marco Metodológico.

## 2.1. Diseño de la Intervención

En el año 2010, solamente el 51% de la población boliviana que vivía en las áreas rurales contaban con acceso a energía eléctrica (SieLAC OLADE , 2019). La Ilustración 1, muestra las diferencias del porcentaje de la población con acceso a electricidad según área geográfica. Del total de estos hogares, el 90.17% corresponden a hogares en situación de pobreza extrema. Esta baja cobertura de electricidad se debía a la distancia de los centros de generación a y la escasa conexión a la red eléctrica.



Fuente: Elaboración propia con datos de SieLAC OLADE (2019).

La dispersión y baja densidad poblacional de las comunidades rurales hace que la conexión a sistemas de generación de electricidad centralizados sea una alternativa económicamente inviable (Fernandez, 2010). La implementación de sistemas aislados locales a base de diésel podría ser una alternativa en poblaciones relativamente concentradas, pero no en poblaciones de alta dispersión.

El uso de energía solar en áreas rurales

de Bolivia es una opción eficiente dado los niveles de radiación que recibe el país. El 97% del territorio boliviano concentra niveles de radiación suficientemente altos para permitir el uso de este tipo de tecnologías a lo largo de todo el año. “Las zonas del altiplano y valles reciben radiación solar a una tasa de entre 5 y 6 kilovatios por hora, por metro cuadrado durante el día (kWh/m<sup>2</sup>-día) y la zona de los llanos entre 4,5 y 5 kWh/m<sup>2</sup>-día; esto se debe a la latitud de Bolivia y a la altitud sobre el nivel del mar del

altiplano” (BID, 2013).

En este contexto, el gobierno de Bolivia implementó un proyecto piloto de instalación de pico-sistemas fotovoltaicos en hogares ubicados en zonas de alta dispersión del área rural. En el país en 2008 cuando se crea el Programa Electricidad para Vivir con Dignidad, existían aproximadamente 180 mil hogares rurales que solo podían ser atendidos mediante la utilización de energías renovables descentralizadas, en particular sistemas fotovoltaicos (BID, 2013). El objetivo del proyecto fue brindar acceso a energía eléctrica y mejorar la calidad de vida de hogares en zonas rurales de alta dispersión. Este proyecto forma parte del programa de Electrificación Rural con Energía Renovable (PERER), coordinado por el Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas y financiado por el BID, con el apoyo del Fondo Nórdico para el Desarrollo (FND). La participación del FND fue fundamental en diferentes aspectos del programa como la financiación de la evaluación de impacto del programa, y en general en la promoción del reemplazo de generadores de diésel con energía renovables, además de la provisión de fuentes de energías alternativas en diferentes áreas rurales del país.

El proyecto de sistemas pico fotovoltaicos del PERER fue implementado en 9 municipios del departamento de Santa Cruz, entre septiembre de 2017 y julio de 2018. Los municipios que participaron del proyecto son: San Miguel de Velasco, San Rafael, San Ramón, San Julián, Carmen Rivero Torrez, Roboré, San Javier, San Antonio de Lomerío y Pailón. Todos ellos se encuentran dentro de la demarcación geográfica conocida como Chiquitanía boliviana<sup>1</sup>. Esta región se caracteriza por sus latitudes tropicales, goza de un clima templado y un relieve predominantemente llano. En términos socioeconómicos, el 62% de la población de

<sup>1</sup> Para la localización geográfica de las viviendas beneficiarias de los sistemas pico véase Ilustración 5 de la sección 3.4

estos municipios es pobre y la mayoría de ellos se encuentra en el cuartil inferior del ranking de desarrollo humano (UDAPE, 2018). Asimismo, los hogares de la zona intervenida no tenían acceso a electricidad antes de la implementación del proyecto<sup>2</sup>. La Ilustración 2 muestra la vivienda prototipo donde se instalaron los paneles solares y las precarias condiciones materiales en las que viven las familias de la zona de intervención.

El PERER implementó un sistema de tamaño medio, que consiste en un panel solar de tecnología cristalina de 10Wp, conectado a una batería recargable con capacidad de 3,000mAh y un grado de protección contra el polvo y agua IP20 o superior. La batería distribuye energía eléctrica a 2 lámparas fijas de tecnología Light-Emitting Diode (LED) de 200 lúmenes con 2W de potencia cada una. Las características del sistema permiten tener acceso a una iluminación constante por un mínimo de 5 horas al día, con factor coincidental de 1 (toda la luminaria encendida). Si bien la función central del sistema es proveer puntos de iluminación en el hogar, el sistema pico fotovoltaico también tiene una lámpara portable LED de 60 lúmenes y ofrece la posibilidad de salida para cargar celular o radio. La principal limitación de estos sistemas es que no cuentan con la capacidad suficiente para hacer funcionar electrodomésticos (BID, 2017; Lighting Global, 2017).

<sup>2</sup> Existe un 7.8% de las familias de la zona de intervención que tenían acceso a electricidad mediante generadores de diésel u otro medio que permitía el uso de electrodomésticos de alta potencia (refrigerador) en el hogar. Visitas de campo establecieron que los generadores no eran utilizados para iluminación, sino para bombear agua en la mayoría de los casos. Además, en Anexo se muestran los efectos de la intervención eliminando esta parte de la muestra. La exclusión de estos casos no altera significativamente los efectos de la intervención.

## Ilustración 2: Condiciones de vida de la Chiquitanía.



Panel A: Prototipo de vivienda donde se instaló el Panel Solar

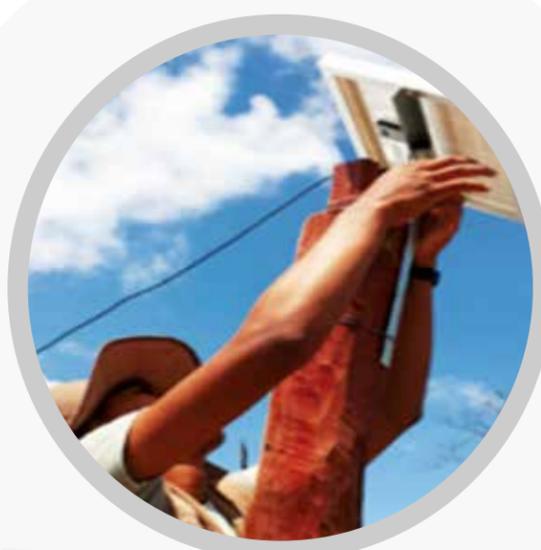


Panel B: Hogar tipo y habitantes de área

Fuente: Registro fotográfico BID (2018)

La Ilustración 3 muestra el proceso de instalación de un sistema pico fotovoltaico (SPFV) en casas de beneficiarios. Los paneles solares fueron instalados en un punto alto fuera de la vivienda (Panel A). La batería fue conectada a este panel y a las lámparas LED mediante un cableado realizado dentro de la vivienda para evitar el riesgo de incendios o mal funcionamiento por conexiones deficientes (Ver Panel D). La batería también tenía una salida para celular o radio, como se observa en la figura (Panel C). Además de la instalación, las familias beneficiadas recibieron una capacitación en el uso y mantenimiento del sistema fotovoltaico (BID, 2017).

**Ilustración 3:** Pico-sistema Fotovoltaico y hogar beneficiado.



Panel A: Panel Solar



Panel B: Batería



Panel C: Lámpara LED

Fuente: Registro fotográfico BID (2018)

La Tabla 1 muestra la línea de tiempo del proyecto. La intervención inició con la identificación de las potenciales comunidades beneficiarias. Para esto, el PERER confeccionó una lista con todas las comunidades del área de intervención que no tenían cobertura eléctrica de ningún tipo y manifestaron su interés en participar del programa. En este proceso, que finalizó en septiembre de 2017, se identificaron 121 comunidades, que albergan a 1.566 familias interesadas en participar del proyecto. Para poder hacer la selección del grupo de tratamiento y control, se planteó que el proyecto fuese implementado de manera escalonada. Es decir, la primera mitad de los beneficiarios fue seleccionada al azar para recibir los SPFV al inicio del proyecto y la segunda, recibió los sistemas un año más

tarde. El total de comunidades recibieron el SPFV al finalizar el proyecto. La selección del primer grupo de beneficiarios, que es el grupo tratado, fue mediante una lotería pública donde participaron personal del proyecto, autoridades municipales, representantes del BID, dirigentes de las comunidades y beneficiarios. En este sorteo fueron seleccionadas 56 comunidades que contienen 768 familias (VMEE, 2017). Antes de realizar el sorteo, se levantó una encuesta de línea de base de una muestra del área de intervención (73 comunidades con 859 familias en total). Finalmente, se levantó una encuesta de seguimiento un año más tarde, mientras se hacía en paralelo la entrega de las pico-lámparas al segundo grupo beneficiado (grupo de control).

**Tabla 1:** Línea de tiempo del proyecto.

FECHA	ACTIVIDAD	# COMUNIDADES-FAMILIAS
01/2017	Elaboración de listado de potenciales beneficiarios	121 - 1.566
09/2017	Levantamiento de línea de base	73 - 859
09/2017	Lotería pública y entrega de pico-sistemas fotovoltaicos al primer grupo de beneficiarios	31 - 444
07/2018	Levantamiento de encuesta de seguimiento	71 - 691
07/2018	Entrega de pico-sistemas fotovoltaicos al segundo grupo de beneficiarios	42 - 365

Fuente: Elaboración propia a partir de base encuestas PERER.

La línea de base consta de 859 familias distribuidas en 73 comunidades. De estas, 31 comunidades conformadas de 444 familias pertenecen al grupo de tratamiento; 42 comunidades con 365 familias pertenecen al grupo de control; y 50 familias no pudieron ser clasificadas por no encontrarse en la lista inicial de beneficiarios<sup>3</sup>. Adicionalmente, no fue

posible aplicar la encuesta de seguimiento a un 20% de las familias de la línea de base que

residentes de comunidades del grupo de tratamiento, no formaron parte del listado inicial de beneficiarios. Existen dos posibles explicaciones: 1) las familias fueron reemplazadas o 2) desde el inicio no formaban parte del proyecto. Se intentó ubicar estas familias por teléfono; lamentablemente, sólo fue posible localizar a 15 de ellas, 5 recibieron el pico-sistema fotovoltaico en la primera entrega y 10 nunca lo recibieron. Dado que se desconoce el motivo por el que la mayoría de estas familias aparece en línea de base, se decidió excluir a todas del análisis.

<sup>3</sup> 50 familias encuestadas en línea de base, la mayoría

ya no estaban en el área cuando se realizó la encuesta (168 observaciones)<sup>4</sup>. En resumen, la línea de base usada en esta evaluación está conformada por 691 familias: 30 comunidades tratadas con 376 familias y 41 comunidades de control con 315 familias.

La entrega del sistema pico fotovoltaico a los grupos de tratamiento y control se realizó en un evento público en la cabecera de municipio. Las familias beneficiarias acudieron a estos actos mediante una invitación. Quienes no acudieron y no tenían una justificación para faltar, no recibieron el sistema fotovoltaico<sup>5</sup>. Alrededor del 2% de las familias del grupo de tratamiento y 11% de las familias del grupo de control no acudieron al acto y fueron reemplazadas por otras familias durante el evento<sup>6</sup>. Este reemplazo se realizó mediante un sorteo entre las familias presentes que no figuraban en la lista de beneficiarios. Por tanto, la validez externa del estudio está limitada a las familias con interés en recibir los sistemas pico fotovoltaicos, pero no a todas las familias de la zona de intervención. Además, para la evaluación de impacto no se consideraron las familias de reemplazo debido a que las mismas no cuenta con contrafactual, ya sea en la línea de base o seguimiento. Se

<sup>4</sup> No se cuenta con información sobre los motivos exactos por los que las familias no se encontraban en el área del proyecto. En el caso de las familias tratadas, fue posible verificar durante las visitas a las comunidades que las familias ausentes migraron. No fue posible visitar a las familias de control porque la entrevista se realizó en los puntos de entrega de los pico-sistemas fotovoltaicos. A pesar de ello, las observaciones de trabajo de campo indican que los líderes de las comunidades justificaban el reemplazo de los beneficiarios señalando que estas familias ya no pertenecían a la comunidad.

<sup>5</sup> Durante el trabajo de campo de levantamiento de la encuesta de seguimiento, se observa que si el beneficiario de un pico-sistema fotovoltaico no estaba presente, acudía algún familiar o vecino para recibir la capacitación y recoger el pico-sistema. En estos casos, los encuestadores realizaron la encuesta de seguimiento en el hogar del beneficiario.

<sup>6</sup> Durante el seguimiento se hizo el esfuerzo de localizar a todas las familias beneficiadas, inclusive las que no formaron parte de la muestra de línea de base, intentando establecer el motivo por el que no fueron encontradas. Así, mediante el diario de campo de los encuestadores fue posible identificar qué familia recibió el pico-sistema fotovoltaico en caso de reemplazo.

incluyeron estas unidades y las 168 familias de la línea de base descritas arriba en estimaciones de pareo para testear la robustez de nuestros análisis. A continuación, se presentan las características socioeconómicas de la muestra, y la estrategia empírica de estimación.

## 2.2. Características de la muestra

Los datos utilizados en la evaluación pertenecen a la encuesta de hogares de línea de base (2017) y de seguimiento (2018) del PERER que corresponde a las familias de tratamiento y control descritas en la Tabla 1.

La Tabla 2 muestra las características promedio en línea de base de las 691 familias que permanecieron en el proyecto por grupos de control y tratamiento. Las características observables de la muestra están balanceadas. Las diferencias entre tratamiento y control en la tasa de abandono del proyecto y las demás variables no son estadísticamente significativas al 5%<sup>7</sup>. Además, se verificó mediante una prueba de permutación F que las diferencias observadas en las variables no son mayores de las que se esperarían dado el proceso de aleatorización. La hipótesis nula de esta prueba es que las diferencias de todas las variables no son sistemáticamente diferentes de cero. Su P-valor es 0.65, por tanto, no se rechazó la hipótesis nula.

También es necesario saber si las diferencias entre grupo de tratamiento y control varían sistemáticamente al pasar de la muestra original a la muestra con desgaste. El mayor riesgo del desgaste en la muestra es que este sea selectivo o asimétrico, es decir, que afecte de manera sistemática y en mayor medida a uno de los grupos. Para verificar esto, estimamos una regresión lineal de una variable binaria de abandono del proyecto sobre todas las variables en línea de base, una variable binaria de tratamiento e interacciones entre el tratamiento

y las variables. Si las diferencias tratamiento-control no varían sistemáticamente por el desgaste, se esperaría que los coeficientes de las interacciones entre el tratamiento y las variables sean simultáneamente cero. Los resultados detallados en la parte inferior de la Tabla 2 respaldan esta hipótesis. El análisis muestra que no existe evidencia a favor de desgaste selectivo en variables observables. Sin embargo, se desconoce si esta hipótesis también es válida para variables no observables. En la siguiente sección describiremos una estrategia para establecer si los resultados de la evaluación son robustos ante este problema.

<sup>7</sup> Este balance también se observa en la muestra original (Ver Tabla 10 en Anexo).

**Tabla 2:** Características promedio or grupo beneficiario en línea de base.

	(1)	(2)	(3)	(4)
	CONTROL	TRATADO	DIFERENCIA	P-VAL
Edad jefe de hogar (años)	46.75	45.94	-0.81	0.60
Jefe de hogar es mujer (%)	0.11	0.15	0.04	0.16
Educación jefe de hogar (años)	7.17	6.92	-0.25	0.74
Jefe de hogar con trabajo (%)	0.92	0.93	0.00	0.86
Menores de 6 años	0.35	0.30	-0.06	0.50
De 6 a 18 años	0.77	0.47	-0.29	0.06
Mayores de 60 años	0.33	0.28	-0.05	0.48
Nro. Miembros	3.23	2.77	-0.46	0.16
Hacinamiento(hab./pers.)	1.37	1.33	-0.04	0.89
Menos de 1000	0.42	0.45	0.04	0.68
De 1001 a 2000	0.26	0.21	-0.04	0.25
De 2001 a 5000	0.24	0.23	-0.01	0.85
Más de 5000	0.08	0.10	0.02	0.73
<b>Posesión de:</b>				
Vivienda propia	0.92	0.95	0.03	0.19
Celular	0.72	0.73	0.01	0.90
Radio	0.72	0.75	0.03	0.64
Televisor	0.17	0.08	-0.09	0.14
Exprimidora	0.02	0.00	-0.01	0.14
Licuada	0.12	0.04	-0.07	0.21
Refrigerador	0.10	0.03	-0.07	0.18
Antena parabólica	0.04	0.02	-0.02	0.27
Computador	0.04	0.02	-0.03	0.27
Impresora	0.03	0.00	-0.02	0.12
Reproductor DVD	0.10	0.05	-0.06	0.15
Generador	0.09	0.08	-0.00	0.93

<b>Uso en horas/día:</b>				
Linterna	2.73	2.74	0.01	0.95
Mechero	2.23	2.71	0.49	0.16
Focos	1.85	0.55	-1.30	0.15
Lámpara	0.08	0.08	0.00	0.94
Celular	3.03	2.28	-0.76	0.22
Radio	7.00	7.32	0.32	0.77
<b>Cantidad/mes:</b>				
Velas (unid.)	12.72	8.91	-3.80	0.06
Pilas para linterna (unid.)	8.01	6.99	-1.01	0.31
Pilas para radio (unid.)	5.05	4.82	-0.23	0.81
Diesel (litros)	12.04	9.63	-2.41	0.70
Gasolina (litros)	17.57	17.03	-0.54	0.91
<b>Gasto en Bs./mes:</b>				
Velas	12.10	8.38	-3.73	0.08
Pilas para linterna	25.88	22.57	-3.31	0.24
Pilas para radio	15.02	15.36	0.34	0.88
Diesel	49.63	38.82	-10.82	0.65
Gasolina	87.27	72.30	-14.97	0.50
<b>Otros impactos:</b>				
Carga cel. en casa (%)	0.31	0.19	-0.12	0.16
Quemaduras por vela/mechero	0.00	0.01	0.01	0.09
Mujeres sin trabajo (en %-497 obs)	0.65	0.59	-0.06	0.42
<b>Test de balance:</b>				
F				3.84
P-valor				0.71
<b>Test desgaste selectivo:</b>				
F				0.67
P-valor				0.53
<b>Observaciones</b>	<b>315</b>	<b>376</b>	<b>691</b>	<b>691</b>

Fuente: Encuesta PERER 2017 (Línea de Base)

Nota: La columna (3) muestra la diferencia en el valor promedio de los dos grupos de variables, y la columna (4) muestra el P-valor de un test de diferencia de medias implementado mediante una regresión simple entre la variable y el tratamiento, con errores estándar corregidos por clúster. El test balance se estima mediante una regresión del tratamiento sobre todas las variables, donde la hipótesis nula es que todos los coeficientes son simultáneamente 0. El test de desgaste selectivo se estima mediante una regresión de la tasa de abandono sobre todas las variables, el tratamiento e interacciones entre tratamiento y las variables, donde la hipótesis nula es que los coeficientes de todas las interacciones son simultáneamente 0. Estos tests se implementan como tests de permutación.

También se analizaron las diferencias en línea de base en las características promedio de las familias que permanecieron o abandonaron el proyecto<sup>8</sup>. Aunque las familias que permanecieron durante el seguimiento del proyecto son en general similares en varias características socioeconómicas a las que lo abandonaron, se pudo identificar algunas diferencias. Las familias que abandonaron el proyecto son más jóvenes, con menos hijos pequeños y menos adultos mayores en el hogar. Además, tienden a tener un mayor poder adquisitivo y mayor acceso a electricidad, ya que un mayor porcentaje de estas familias posee generador, tiene más horas de uso de lámparas, pilas para linterna, mayor consumo de pilas para linterna y diésel y menor consumo de velas. Las diferencias en todas estas variables, a excepción de las dos últimas, son estadísticamente significativas al 10%.

En general, hubo un cambio en la composición del total de familias del proyecto como consecuencia del desgaste de la muestra. Si el desgaste de la muestra no es selectivo, la pérdida de observaciones tendrá consecuencias sobre el poder para estimar el efecto de la intervención y la validez externa del estudio. Es posible recuperar el efecto de la intención de tratamiento (ITT), pero no el efecto promedio del tratamiento (ATE). En la siguiente sección, se explica la estrategia empírica que seguimos para obtener un ITT robusto.<sup>9</sup>

## 2.3. Estrategia Empírica de Estimación

La evaluación fue diseñada como un experimento aleatorio controlado por clústeres, en el que el tratamiento – la instalación de los sistemas pico fotovoltaicos – se asignó aleatoriamente a cerca de la mitad de las comunidades del área de intervención (comunidades beneficiadas), y se dejó a la otra mitad como grupo de control (comunidades no beneficiadas). Una de las ventajas de tener un diseño experimental con asignación aleatoria a nivel comunitario es que reduce posibles contagios de la intervención sobre las familias del grupo de control. Sin embargo, por el desgaste de 20% ocurrido en la muestra original, el estudio se concentra identificar el efecto de la intención de tratamiento del proyecto (ITT) y no el efecto promedio del tratamiento (ATE). La estimación del ITT se calculó mediante la diferencia del promedio de las variables de resultado e impacto entre tratamiento y control, evaluada en la muestra con desgaste. Debido a que el desgaste de la muestra podría ser selectivo, en observables o no observables, se presentan especificaciones alternativas como ejercicios de robustez: (1) la estimación del ITT con datos de pareo utilizando las familias tratadas en línea de base que no cuentan con encuesta de seguimiento, (2) un modelo de diferencias en diferencias. Para mayores detalles sobre la estrategia de estimación véase Anexo 6.1 del documento.

$$y_{i,c,t} = \alpha + \beta_{ITT}T_i + \delta X_{i,t} + \varepsilon_{i,c,t} \#(1)00$$

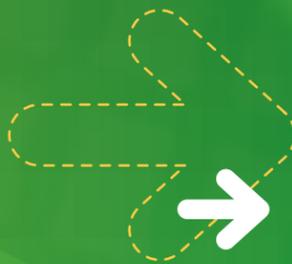
<sup>8</sup> Ver Tabla A3 en el Anexo.

<sup>9</sup> Adicionalmente, Se utilizó un modelo IPW (Inverse Probability Weighting) para estimar los efectos del proyecto reponderando los datos de la muestra en función de las observaciones en línea de base, aproximándonos de esta forma a la composición inicial (antes del desgaste). Los resultados muestran estimaciones levemente superiores a las obtenidas con datos sin ponderar. Esto muestra que las estimaciones probablemente subestimen el verdadero ATE (Ver Anexo).



03

# Efectos del uso de paneles solares en la Chiquitania.



En esta sección se describen diferentes efectos del sistema pico fotovoltaico. Cualitativamente, los efectos se aproximan a lo previsto en la cadena de resultados del proyecto, aunque no todos son estadísticamente significativos. Se inicia con la descripción de los cambios en el uso diario de fuentes de iluminación tradicionales y alternativas (pico-lámparas). Consistente con lo descrito en otros proyectos similares<sup>10</sup>, la instalación de los sistemas pico fotovoltaicos genera una sustitución parcial entre velas, linternas o lámparas a gas por luz eléctrica como fuente de iluminación. Por lo general, estos equipos pueden sustituir fuentes de iluminación tradicionales como linternas y velas o mecheros, pero no tienen la capacidad para hacer funcionar electrodomésticos o proveer energía permanente a todo el hogar. Normalmente, los sistemas aislados tienen una capacidad menor y no alcanzan a cubrir todas las necesidades del hogar (Banco Mundial, 2008).

Posteriormente, se describen las consecuencias de esta sustitución sobre el gasto mensual en fuentes de energía. Bajo la suposición de que los costos de inversión son una donación, se encuentra que la reducción en el uso de velas y pilas genera un ahorro estadísticamente significativo y suficientemente alto para cubrir los costos de operación y mantenimiento del pico-sistema fotovoltaico. A continuación, se analizan los posibles efectos del proyecto sobre la calidad de vida de las familias de dos maneras. Primero, se estima el incremento en la calidad de iluminación en el hogar, medido en kilo-lúmenes. Segundo, se estima el efecto en otras variables de impacto, como quemaduras/lesiones por fuego y la facilidad de cargar el celular en casa. Ambas variables resultan ser estadísticamente significativas. Finalmente,

<sup>10</sup> Ver, por ejemplo, Aklin et al., (2017), Barnes (2005), Banco Mundial (2008).

se describen los impactos ambientales del programa.

## 3.1. Horas de uso de fuentes de energía

Existe una reducción estadísticamente significativa al 10% en las horas de uso diario de linternas, mecheros y lámparas a gas, acompañadas de un incremento significativo al 1% en las horas de uso diario de luz eléctrica (iluminación por focos, esencialmente, las pico-lámparas). La Tabla 3 muestra el uso en horas/día de diferentes fuentes de iluminación después de la implementación del proyecto.

El efecto de la intervención aumenta levemente al pasar de la estimación básica del ITT al modelo de diferencias en diferencias, aunque este incremento no es estadísticamente significativo<sup>11</sup>. Este patrón se repite al medir los efectos de las demás variables de resultado e impacto, lo que indica que, si existe un sesgo por desgaste selectivo, probablemente opera en sentido contrario al efecto del programa, subestimando su impacto. Por tanto, los resultados del modelo base pueden ser vistos como el límite inferior de los efectos del programa.

<sup>11</sup> Se verificó esto mediante una prueba de Wald de diferencia de coeficientes entre las regresiones de los modelos básico y diferencias en diferencias. El menor P-valor fue de 0.32 y corresponde a las estimaciones del efecto del uso diario de mechero.

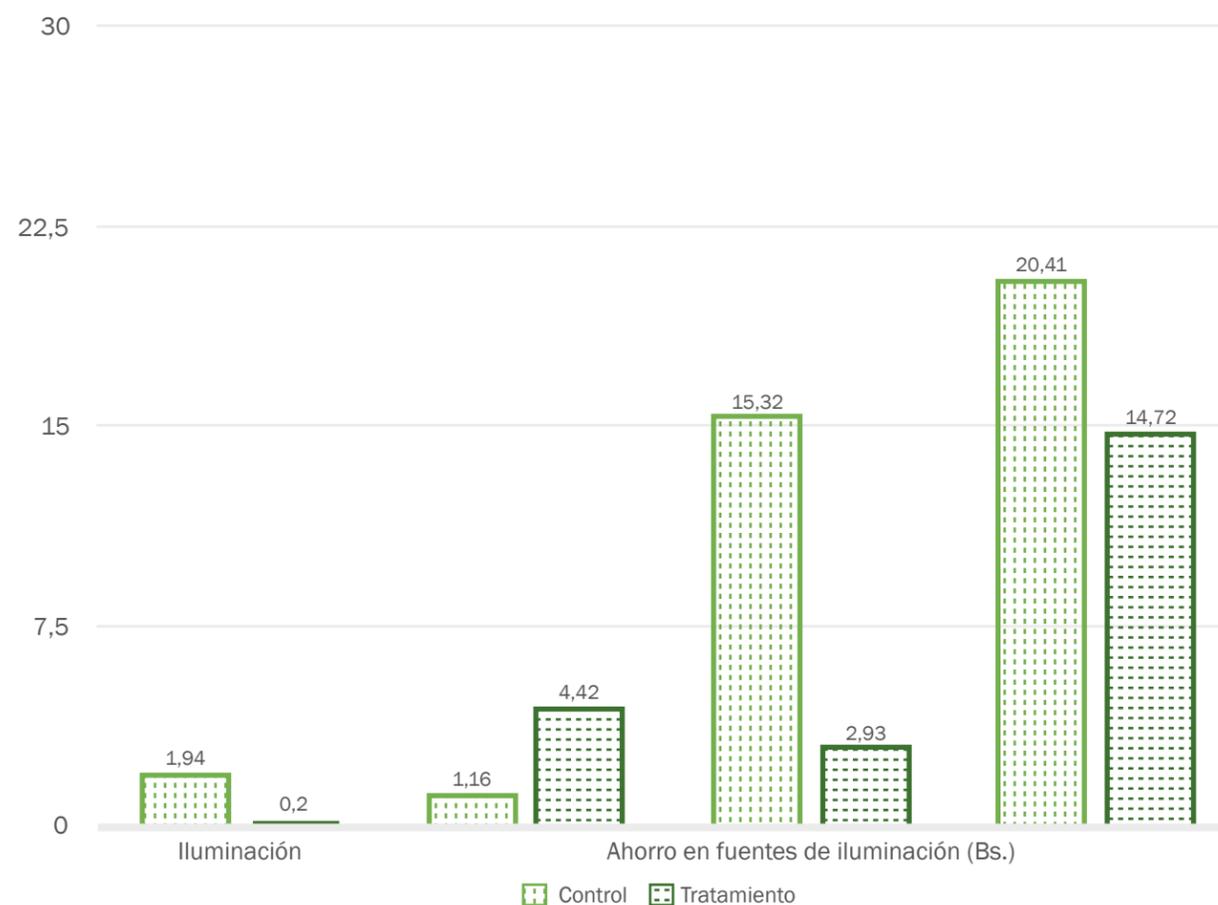
**Tabla 3:** Efecto del sistema pico Fotovoltaico en el uso diario de fuentes de iluminación (horas/día).

	ITT	DID	DID (LOG)	MATCHING
<b>Luz Eléctrica</b>				
Efecto del tratamiento	3.486*** (0.238)	4.224*** (0.380)	1.272*** (0.077)	3.211*** (0.235)
<b>Linterna</b>				
Efecto del tratamiento	-0.397*** (0.101)	-0.451** (0.185)	-0.205*** (0.071)	-0.429*** (0.139)
<b>Mechero</b>				
Efecto del tratamiento	-1.848*** (0.143)	-2.110*** (0.262)	-0.697*** (0.078)	-1.758*** (0.217)
<b>Lámpara</b>				
Efecto del tratamiento	-0.105** (0.046)	-0.127** (0.059)	-0.037** (0.017)	-0.004 (0.026)
Observaciones	688	687	687	856

Nota: \*p<0.1, \*\*p<0.05, \*\*\*p<0.01. Errores estándar corregidos por clúster entre paréntesis. Las variables de control de las especificaciones de columnas pares son las características sociodemográficas de la Tabla 3, además de los controles de línea de base. La especificación completa del modelo se puede obtener de los autores. El procedimiento de matching es Propensity Score matching, incluye las familias que estaban en la línea de base y no en la encuesta de seguimiento (168).  
ITT: Intención del tratamiento, DiD: Diferencias en diferencias, DiD (Log): Diferencias en diferencias, Matching: Propensity Score Matching.

La mayor reducción en el uso de fuentes tradicionales de iluminación está en el uso de mecheros. Los resultados muestran que, en promedio, el uso de mechero por día se reduce en 1.74 horas en los hogares beneficiados respecto a los no beneficiados. Los hogares no beneficiados utilizan mecheros por 1.94 horas/día, y los hogares beneficiados, sólo por 0.2 horas/día<sup>12</sup>. Considerando que el nivel de uso de mecheros de hogares beneficiados y no beneficiados era similar antes de la intervención, se puede concluir que el proyecto habría logrado reducir en 90% el uso de esta fuente de iluminación.

**Ilustración 4:** Efecto del sistema pico Fotovoltaico sobre el uso de mecheros (en horas/día) y Ahorro del hogar en fuentes de iluminación tradicionales.



Fuente: Elaboración propia. Figura ilustrativa del efecto del tratamiento.

<sup>12</sup> Para ver los valores promedio de tratamiento y control en seguimiento ir a Tabla A 5 en Anexo.

Por otro lado, en promedio, el uso diario de luz eléctrica aumentó en 3.48 horas en los hogares beneficiados, respecto a los hogares no beneficiados, como se detalla en la Tabla 3. En términos relativos, la intervención habría logrado que los hogares beneficiados utilicen 3 veces más luz eléctrica que los hogares no beneficiados, cuyo uso de luz eléctrica es 1.17 horas/día en seguimiento. Este incremento no sólo compensa la caída en el uso de mecheros, linternas y lámparas a gas (2.35 horas/día), sino que también incrementa las horas de iluminación que dispone un hogar por día. Además, el tiempo de uso se aproxima al número de horas de luz del sistema fotovoltaico con factor coincidental 1 (5 horas), lo que indica que los hogares están utilizando eficientemente el sistema (dentro de sus parámetros de capacidad). A continuación, se muestra el efecto que tuvo esta sustitución de fuentes tradicionales en el gasto mensual de los hogares.

## 3.2. Gasto en iluminación

Los resultados muestran que existe una caída estadísticamente significativa al 5% en el gasto mensual de velas y baterías para linterna y radio. La Tabla 4 presenta la reducción en el

gasto mensual en fuentes tradicionales rurales de energía, que acompaña la reducción en consumo observado en la tabla anterior.

**Tabla 4:** Efecto del sistema pico Fotovoltaico en el gasto mensual en fuentes tradicionales de Iluminación. (en Bs/MES).

	ITT	DiD	DiD (Log)	
<b>Velas</b>				
Efecto del tratamiento	-13.250*** (2.080)	-10.460*** (2.406)	-1.286*** (0.162)	-0.453*** (0.103)
<b>Baterías</b>				
Efecto del tratamiento	-7.551*** (2.514)	-7.771** (2.754)	-0.238*** (0.068)	-0.221* (0.123)
Observaciones	687	687	687	671

Fuente: Encuesta PERER (2017, 2018).

Nota: \*p<0.1, \*\*p<0.05, \*\*\*p<0.01. Errores estándar corregidos por clúster entre paréntesis. Las variables de control de las especificaciones de columnas pares son las características sociodemográficas de la Tabla 3, además de los controles de línea de base. La especificación completa del modelo se puede obtener de los autores.

El procedimiento de matching es Propensity Score matching, incluye las familias que estaban en la línea de base y no en la encuesta de seguimiento (168).

ITT: Intención del tratamiento, DiD: Diferencias en diferencias, DiD (Log): Variable dependiente en Logaritmo, ZNB: Zero-Inflated Negative Binomial solo toma en cuenta el gasto que es mayor a cero, la interpretación es el gasto en velas es multiplicativo, es decir el gasto disminuye en promedio en Bs. 0.6357 (exp(-0.453)) por unidad gastada en velas.

Los resultados anteriores muestran que el gasto mensual promedio en velas se reduce en Bs. 13.25 en los hogares beneficiados respecto a los hogares no beneficiados, y el gasto mensual promedio en baterías se reduce en Bs. 7.55. Esto quiere decir que los hogares beneficiados habrían logrado un ahorro mensual de Bs. 20.8 en el consumo de energía, lo que representa una reducción de 21% del gasto promedio total de un hogar no beneficiado en este rubro (Bs.100.14/mes).

El estudio financiero y económico de los sistemas pico fotovoltaicos del BID (2013) muestra que, considerando que la inversión inicial fue una donación, si se cobrara un precio de Bs. 8.07/mes (US\$ 1.16/mes), se cubrirían los costos de mantenimiento, reposición y operación. Por tanto, con los efectos observados en el ahorro mensual del gasto en velas y pilas es posible cubrir estos costos, lo que hace que el proyecto tenga un beneficio social y financieramente sostenible.

El efecto que tiene el proyecto también puede medirse por la calidad de luz que reciben los hogares al sustituir fuentes de baja intensidad, como velas, linternas y lámparas a gas, por fuentes de mayor intensidad, como las lámparas LED. Por tanto, se estima la cantidad total de lúmenes que consumen los hogares por mes. Una primera aproximación al efecto del programa sobre la calidad de luz muestra que la intervención incrementó la cantidad total de lúmenes de 13.54 a 31.78 kilo-lúmenes/mes, y redujo el precio por kilo-lumen, de Bs. 14.55 a Bs. 5.54. Es decir, con el proyecto se alcanza una mejora significativa en la calidad de luz a un menor costo. Se esperaría que esto incremente el excedente del consumidor en la demanda por iluminación. Los detalles están en Anexo.



Fuente: Registro fotográfico BID (2013)

### 3.3. Otras variables socioeconómicas de impacto

Se espera que una mejor iluminación en el hogar tenga consecuencias positivas sobre la calidad de vida de las familias, entre ellas una reasignación de los tiempos destinados a hacer actividades dentro y fuera del hogar. Por ejemplo, desarrollar otras actividades productivas o hacer tareas escolares en el hogar. Además, una mejor iluminación podría facilitar la lectura de libros o la redacción de documentos, lo que podría generar consecuencias sobre el rendimiento escolar de los niños (GIZ, 2016). A esto deben ser sumados otros beneficios sociales asociados a la instalación del sistema pico fotovoltaico, como el uso de la batería para recargar el celular, que puede tener implicaciones positivas en la comunicación de las familias. A continuación, se presenta el efecto del proyecto en algunas de estas variables.

La Tabla 5 muestra que el proyecto tuvo un efecto positivo y significativo al 1% sobre el porcentaje de familias que cargan el celular en casa (columnas 1 y 2). El porcentaje de familias que cargan celular en casa aumentó en 50 puntos porcentuales a causa de la intervención. Esto indica que las horas disponibles para usar el celular en la familia podrían haber aumentado. A pesar de no tener evidencia específica de un cambio en los patrones de uso del celular, sería esperable que los miembros de la familia puedan contactarse entre sí y con el resto de su comunidad con más facilidad, lo que podría mejorar su calidad de vida; por ejemplo, podría resultar útil durante emergencias o para reprogramar controles de salud<sup>13</sup>.

Adicionalmente, la Tabla 5 muestra un efecto estadísticamente significativo al 10% en las quemaduras por vela o mechero. Los resultados señalan que la probabilidad de que un miembro de la familia tenga estas quemaduras reduce en un punto porcentual. Esta reducción representa una caída de 100% en esta probabilidad respecto a su valor en el grupo tratado antes de la intervención.

Además de las variables descritas, se estimaron los efectos del programa sobre los ingresos agropecuarios, variedad de cultivos y animales, y años de educación. A pesar de que los resultados van en la dirección esperada, ninguno de ellos fue estadísticamente significativo. Los resultados se encuentran en Anexo.

celular es nulo. El efecto aumenta levemente cuando se restringe la muestra a las familias que tienen señal de celular en su comunidad. Sin embargo, no es estadísticamente significativo. Ver Tabla A 8 en Anexo.

<sup>13</sup> El efecto del proyecto sobre las horas diarias de

**Tabla 5:** Efecto del sistema pico Fotovoltaico en otras variables de impacto del hogar.

	CARGA CELULAR EN CASA (%)		QUEMADURAS POR VELA/MECHERO		MUJERES SIN TRABAJO (EN %)	
	ITT	DID	ITT	DID	ITT	DID
Efecto del tratamiento	0.50***	0.55***	-0.01*	-0.02**	-0.04	0.01
	(0.05)	(0.05)	(0.01)	(0.01)	(0.06)	(0.09)
Observaciones	681	681	681	681	429	429

Fuente: PERER(2017, 2018)

Nota: \*p<0.1, \*\*p<0.05, \*\*\*p<0.01. Errores estándar corregidos por cluster entre paréntesis. Las variables de control son las características sociodemográficas de la Tabla 3, además de los controles de línea de base. La especificación completa del modelo se puede obtener de los autores.

ITT: Intención del tratamiento, DiD: Diferencias en diferencias

## 3.4. Impactos Ambientales

La electrificación rural con energía renovable coadyuvó a su vez a reducir los impactos ambientales de la generación eléctrica a partir del uso de combustibles fósiles. Para cuantificar el impacto ambiental de usar paneles solares para generar electricidad es muy importante tomar en cuenta los posibles beneficios externos de las emisiones evitadas producto del uso de paneles solares como alternativa de generación eléctrica. El Comité Nacional de Despacho de Carga reporta que para el año 2018, el 69.81% de la generación bruta proviene de centrales termoeléctricas, el 28.23% proviene de centrales hidroeléctricas, 1.32% de plantas solares y 0.64% de parques eólicos.

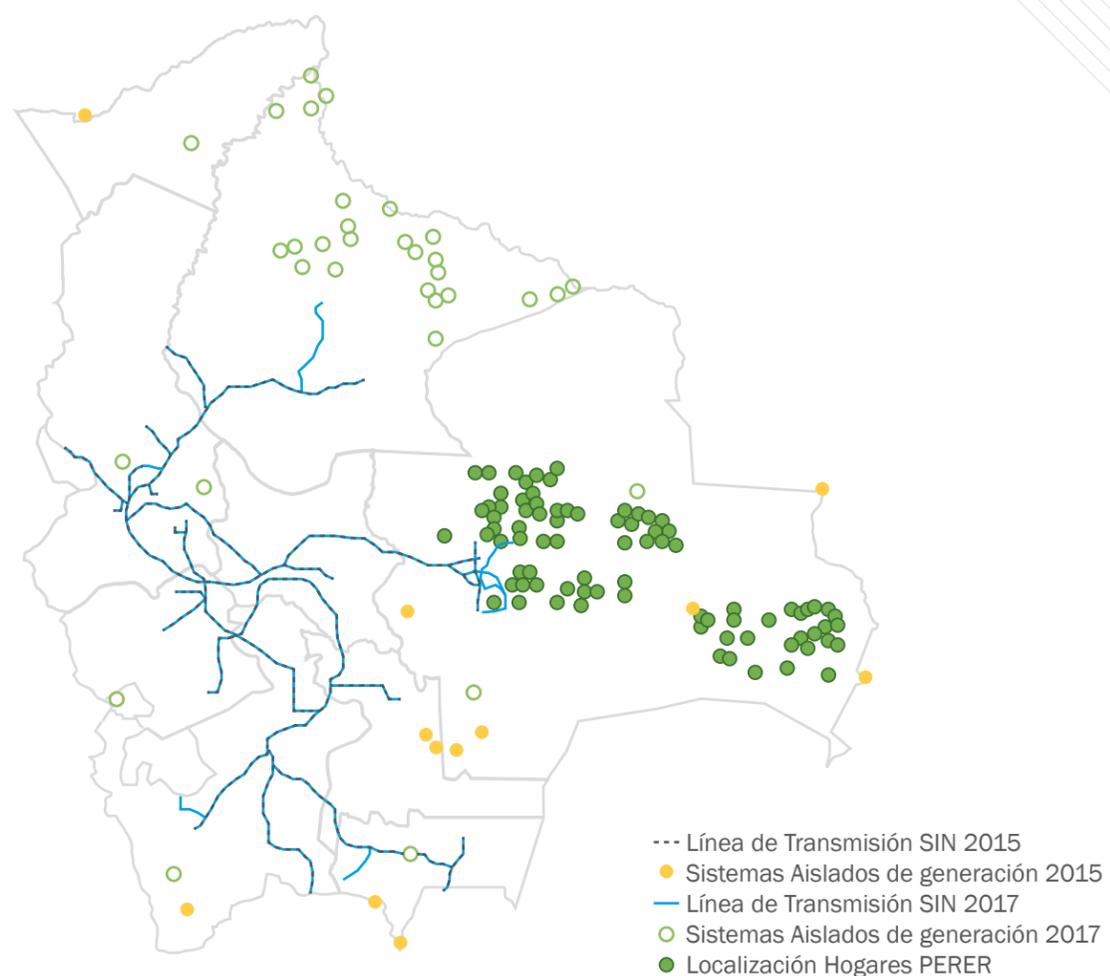
La Ilustración 5 a continuación, muestra el alcance de la línea de transmisión del Sistema Interconectado Nacional (SIN) para los años 2015 y 2017, muestra también los sistemas de generación aislados para los años 2015 y 2017. Si bien se puede observar los esfuerzos por extender la línea de transmisión e implementar sistemas aislados, es evidente que el área donde se entregaron los paneles solares no contaba con electricidad. La Ilustración 5 muestra a su vez, la ubicación geográfica de las viviendas que recibieron el panel solar<sup>14</sup>. Es importante mencionar, que si bien la dotación de paneles solares es una solución para las familias en temas de iluminación no abarca el total de necesidades de electrificación de las familias.



Fuente: Registro fotográfico BID (2018)

<sup>14</sup> Comité Nacional de Despacho de Carga CNDC - Bolivia. [https://www.cndc.bo/media/archivos/estadistica\\_anual/genbruta\\_2019.htm](https://www.cndc.bo/media/archivos/estadistica_anual/genbruta_2019.htm)

**Ilustración 5:** Localización de las viviendas beneficiarias de los sistemas pico.



Fuente: Elaboración propia con información del Ministerio de Energías de Bolivia y datos del programa PERER<sup>15</sup>.

La Tabla 6 a continuación muestra el potencial de emisiones evitadas producto de la instalación de paneles solares. Para calcular las emisiones evitadas, se imputaron las horas de uso del panel solar de la encuesta de seguimiento a su equivalente en emisiones de CO<sub>2</sub> producto

<sup>15</sup> Ministerio de Energías de Bolivia <http://sigvmeea.minenergias.gob.bo/layers/>

del consumo de electricidad de los sistemas aislados. Para ello se calculó la distancia de los hogares PERER al generador más cercano (columna 1 muestra la capacidad instalada de los sistemas aislados cercanos a los puntos PERER). Se distribuyó los hogares como se muestra en la columna 2 de la Tabla a continuación de acuerdo a la distancia mínima. Posteriormente, se convirtió el número de horas de uso de electricidad de la encuesta de seguimiento para el total de hogares (columna 3) a su equivalente a consumo electricidad (columna 4) en kilowatts hora tomando en cuenta las características

técnicas de los sistemas de iluminación descritos anteriormente. Finalmente, aplicando factores de emisiones por tipo de tecnología de generación, computamos y agregamos las emisiones evitadas producto de la dotación de paneles solares como se muestra en la columna 5 de la Tabla 6. Fernandez y Fernandez

Vásquez (2018) reportaron un factor de emisión promedio anual de 0.42 tonCO<sub>2</sub>/MWh para el total del sector eléctrico boliviano en 2014, con cálculos basados en factores de emisiones del IPCC. En el caso de los sistemas pico fotovoltaico, estimamos un factor de emisiones promedio evitadas de 0.21 KgCO<sub>2</sub>/KWh por día.

**Tabla 6:** Efecto del Pico-sistema fotovoltaico en emisiones de CO<sub>2</sub>

CENTRAL DE GENERACIÓN	CAPACIDAD POTENCIA KW	NÚMERO DE FAMILIAS	TOTAL HORAS DE USO DEL PANEL*	CONSUMO (KWH)	EMISIONES (KGC02)**
Diesel Oil	15,502.19	434.00	2,591.50	103,660.00	25,830.30
Las Misiones	21,350.00	241.00	1,794.50	71,780.00	17,886.35
San Ignacio de Velasco	8,200.00	193.00	797.00	31,880.00	7,943.95
Termoelectrica	14,192.57	183.00	1,954.00	78,160.00	14,153.47
Ipías	5,840.00	76.00	756.00	30,240.00	5,475.96
Mataral	11,640.00	10.00	83.00	3,320.00	601.20
Puerto Suarez	21,000.00	97.00	1,115.00	44,600.00	8,076.31
<b>TOTAL</b>	<b>29,694.76</b>	<b>617.00</b>	<b>4,545.50</b>	<b>181,829.00</b>	<b>39,983.77</b>

(\*) Total horas reportadas por día en la encuesta.

(\*\*) Factores de emisión: pounds CO<sub>2</sub>/MMBTU: Diesel 161.3 CO<sub>2</sub>/MMBTU y 117.0 Gas Natural Fuente: U.S. Energy Information Administration.

# Conclusiones.

**E**n este documento se analizaron los efectos socioeconómicos de la implementación de sistemas pico fotovoltaicos en áreas rurales de nueve municipios del departamento de Santa Cruz, Bolivia. El objetivo de este proyecto era proveer energía eléctrica a familias que viven en zonas muy aisladas y dispersas del área rural. Este tipo de sistemas permiten suplir parcialmente las necesidades de electricidad en zonas donde la conexión a la red principal de electrificación es muy costosa. Así, la principal función del sistema es proveer iluminación en el hogar. También puede ser utilizado para cargar teléfonos celulares o radios, pero no tiene la capacidad para hacer funcionar electrodomésticos o proveer energía permanente a todo el hogar.

Dada la pérdida de 20% en la muestra de beneficiarios durante el periodo de evaluación, y con el objetivo de analizar un posible sesgo que esta situación pudiera generar en los efectos estimados de la intervención (sesgo por atrición o desgaste selectivo), se propuso una metodología de evaluación basada en una diferencia simple en el promedio de las variables de resultado e impacto entre los grupos de tratamiento y control para las familias que permanecieron en el proyecto, seguida de dos ejercicios de robustez: un modelo de diferencias en diferencias y un modelo pareo (Matching). Como resultado del análisis se encontró que el sesgo potencial por desgaste selectivo reduciría el efecto verdadero del programa.

A pesar de su limitado alcance, se considera que **el sistema pico fotovoltaico logró generar beneficios sociales sobre la población en el corto plazo**. Estos beneficios pueden resumirse en: (1) una sustitución de fuentes de energía tradicionales (velas, mecheros), que son de baja luminosidad, por fuentes de luminosidad alta que provienen de energía renovable (las pico-lámparas); (2) esta sustitución significó un ahorro en el gasto en fuentes de iluminación

tradicionales superior a los costos de operación del pico-sistema; y (3) una mejora en la calidad de vida de las familias que puede verse reflejada en un aumento del porcentaje de familias que cargan el celular en casa y la reducción de la probabilidad de que un miembro de la familia sufra quemaduras por vela o mechero.

**Los resultados de la evaluación indican que el proyecto consiguió reducir el gasto mensual en energía en Bs.20.8 /mes**, debido a la caída en el consumo de velas y baterías. Este ahorro representa un 21% del gasto total en este rubro y es mayor al costo de operación, mantenimiento y reposición del sistema pico fotovoltaico, de Bs. 8.07/mes, lo que hace que el proyecto tenga un beneficio social financieramente sostenible.

Además de la caída en el uso de velas y baterías, hubo una reducción estadísticamente significativa al 10% en el uso de otras fuentes de iluminación tradicionales como mecheros y lámparas a gas, y un incremento significativo al 1% en las horas de uso de luz eléctrica por día. Este incremento fue de al menos en promedio 3.48 horas/día, valor que se encuentra dentro del rango de horas que permite la capacidad del sistema fotovoltaico, lo que denota un uso eficiente.

Los beneficios de la sustitución de fuentes tradicionales de iluminación por las pico-lámparas pueden cuantificarse mediante el cambio en la cantidad de consumo total de iluminación por mes y el precio de la iluminación. Los resultados muestran que el consumo de iluminación mensual de un hogar incrementó en 18.24 kilo lúmenes y el precio por kilo lumen redujo en Bs. 8.96 luego de la intervención. Esto representa un beneficio económico anual de aproximadamente US\$ 308.69, calculado a partir de la disponibilidad a pagar de las familias beneficiadas. Ese monto supera el costo de inversión de los sistemas pico fotovoltaicos en el punto de instalación, de US\$ 204. **Por tanto, los**

retornos sociales del proyecto en iluminación son positivos, lo que justifica la inversión realizada.

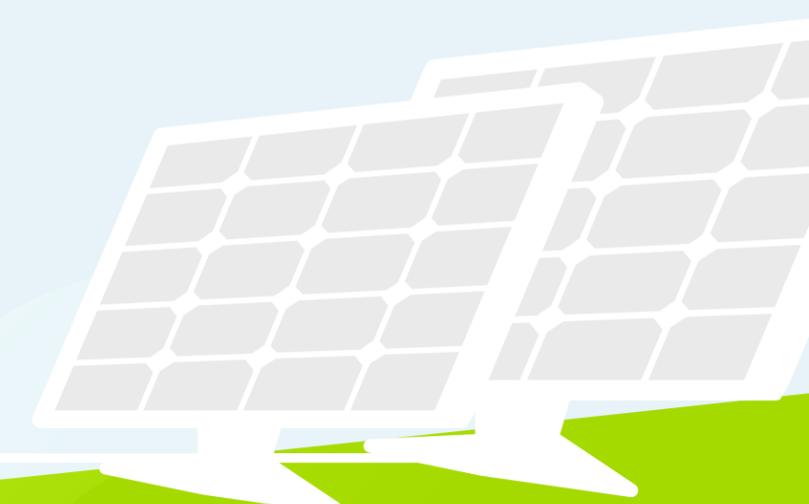
Finalmente, se encontraron dos efectos que denotan una mejora en la calidad de vida de los hogares. **Uno de los efectos consiste en la reducción de la probabilidad de que un miembro del hogar tenga quemaduras por vela o mechero.** Esta probabilidad cae en un punto porcentual, que representa una reducción del 100% respecto a su valor en línea de base. El otro efecto de la intervención es el aumento en 50 puntos porcentuales en el porcentaje de familias que cargan su teléfono celular en casa.

Otros efectos de la intervención que no pudieron contabilizarse adecuadamente por limitaciones de información fueron efectos sobre el ambiente de la vivienda de las familias. Al sustituir fuentes tradicionales de iluminación, como velas y mecheros, que suelen emitir gases tóxicos, se esperaría que mejore la salud de las familias. Además, se esperaría que reduzca la probabilidad de incendios. Se espera que una recopilación más detallada de variables de salud y seguridad familiar ayude a identificar estos efectos en evaluaciones futuras.

## 5. Referencias

- Angrist, J. D., & Pischke, J.-S. (2009). *Mostly harmless econometrics: an empiricists companion*. Princeton.
- Banco Mundial. (2008). *The Welfare Impact of Rural Electrification: A Reassessment of the Costs and Benefits*. Washington, D.C. doi:10.1596/978-0-8213-7367-5
- Barnes, D. F. (Ed.). (2005). *Draft for discussion. Meeting the Challenge of Rural Electrification in Developing Nations: The Experience of Successful Programs*. Energy Sector Management Assistance Program.
- BID. (2013). *Evaluación Financiera y Económica del Proyecto Electrificación Rural con Energía Renovable (BO-X1013)*. Cochabamba. Retrieved 2018, from <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=37894538>
- BID. (2013). *Programa de Electrificación Rural con Energía Renovable*. La Paz. Retrieved 2018, from <https://www.iadb.org/en/project/BO-X1013>
- BID. (2017). *Pliego de Licitación Pico Sistemas Fotovoltaicos*. La Paz, Bolivia: BID.
- Dinkelman, T. (2011). The effects of rural electrification on employment: New evidence from South Africa. *American Economic Review*, 101(7), 3078-3108.
- Fernandez, M. (2010). *Rol e impacto socioeconómico de las Energías Renovables en el área rural de Bolivia*. La Paz: CEDLA.
- Fernandez, M. and Fernandez Vazquez, C. (2018). *Inventario, evaluación y proyección de las emisiones de carbono provenientes del sector eléctrico nacional. Bolivia 2025*. *RevActaNova*. vol.8 no.3 Cochabamba mar. 2018.
- Fitzgerald, J., Gottschalk, P., & Moffitt, R. A. (1998). An analysis of sample attrition in panel data: The Michigan Panel Study of Income Dynamics.
- GIZ. (n.d.). *Impactos (2005 - 2010) Proyecto EnDev Bolivia - Acceso a Energía*. Retrieved 2018, from <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=37864320>
- INE. (2012). *Censo de Población y Vivienda*. La Paz.
- Lee, D. S. (2009). Training, wages, and sample selection: Estimating sharp bounds on treatment effects. *The Review of Economic Studies*, 76(3), 1071-1102.
- Lighting Global. (2017). *Standardized Specifications Book*.

- 
- McKenzie, D. (2012). Beyond baseline and follow-up: The case for more T in experiments. *Journal of development Economics*, 99(2), 210-221.
  - Mejdalani, A., Mendes e Costa, R., Hallack, M., Lopez-Soto, D. and Vazquez, M. (2018). A Brighter Future: The Impact of Rural School Electrification Programs on the Dropout Rate in Primary Education in Brazil. Inter-American Development Bank, Washington, D.C.
  - SiELAC OLADE . (2019). <http://sielac.olade.org/>.
  - UDAPE. (2018, Enero 16). Dossier de Estadísticas Vol.28. Retrieved from [http://www.udape.gob.bo/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=38](http://www.udape.gob.bo/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=38)
  - VMEE. (2017). PERER: Acta de taller de capacitación y procedimiento de selección de beneficiarios primera etapa. Santa Cruz, Bolivia: Vice-Ministerio de Electricidad y Energías Alternativas.
  - Wing, C., Simon, K., & Bello-Gomez, R. (2018). Designing Difference in Difference Studies: Best Practices for Public Health Policy Research. *Annual review of public health*, 39, 453-469.



## 6.1. Estrategia de estimación e identificación

Debido al desgaste de 20% ocurrido en la muestra original, descrito en la sección 2 del documento, el estudio se concentra identificar el efecto de la intención de tratamiento del proyecto (ITT) y no el efecto promedio del tratamiento (ATE). La estimación del ITT se calculó mediante la diferencia del promedio de las variables de resultado e impacto entre tratamiento y control, evaluada en la muestra con desgaste. Como se mencionó durante el documento, una de las ventajas de tener un diseño experimental con asignación aleatoria a nivel comunitario es que reduce posibles contagios de la intervención sobre las familias del grupo de control. Es decir, que familias tratadas generen una externalidad sobre familias de control a causa de la intervención (como por ejemplo que familias tratadas presten el cargador y linterna a familias de control o que la iluminación de una familia aumente la luz disponible en los senderos de la comunidad). Esto invalidaría la estrategia de identificación de los efectos de la intervención. Una revisión de la línea de base mostró que el nivel de asignación del tratamiento se respetó en la gran mayoría de los casos.

Para estimar el ITT se procede con la siguiente regresión:

$$y_{i,c,t} = \alpha + \beta_{ITT}T_i + \delta X_{i,t} + \varepsilon_{i,c,t} \#(1)$$

donde  $y_{i,c,t}$  es una variable de resultado o impacto de la intervención de la familia  $i$  y comunidad  $c$ , en el tiempo de la encuesta,  $t=1$ , que corresponde a la encuesta de

seguimiento.  $T_i$  es una variable binaria que es igual a 1 si la familia está en el grupo de tratamiento (beneficiado en la primera entrega) y 0 caso contrario.  $\beta_{ITT}$ , el coeficiente asociado a  $T_i$ , mide el efecto esperado del programa.

Finalmente,  $\varepsilon_{i,c,t}$  es el término de error, que tiene dos componentes, uno comunitario y uno idiosincrático.  $X_{i,t}$  representa las variables de control, en específico, características sociodemográficas como: la educación del jefe de hogar, composición familiar, tramo de ingreso familiar y posesión de activos en el hogar.

Seguidamente, se estima un score de propensión mediante un modelo probit donde la variable dependiente es el tratamiento,  $T_i$ , y las variables independientes son todas las variables de control en línea de base:

()

Luego, se construye el estimador de matching, usando un kernel PSM.

Finalmente, se estima un modelo de diferencias en diferencias con panel efecto fijo que permite controlar por el efecto de variables no observables fijas en el tiempo y, por tanto, ayuda a reducir el sesgo por desgaste selectivo en no observables. La especificación del modelo de diferencias en diferencias es:

()

donde  $\alpha_i$  es un efecto fijo de familia,  $W_i$  es un indicador de tiempo, que es igual a 1 si los datos son de la encuesta de seguimiento y 0 caso contrario, y  $\beta_{DID}$  es el efecto esperado del

programa.

Se mostrarán las especificaciones propuestas para cada una de las variables de resultado e impacto como los resultados principales del estudio. Comparando resultados será posible conocer la magnitud y dirección del sesgo por desgaste selectivo. Existe un trade-off entre sesgo y eficiencia por utilizar un modelo de diferencias en diferencias en lugar del estimador de ITT. La ventaja de utilizar un modelo de diferencias en diferencias es que controla por variables no observables fijas en el tiempo, lo que reduce el sesgo en el ITT. Sin embargo, cuando la correlación entre las variables de resultado en línea de base y seguimiento es baja, corregir por desbalances pequeños en línea de base mediante un modelo de diferencias en diferencias puede ser ineficiente (McKenzie, 2012).

## 6.2. Test de balance muestra completa en línea de base

La Tabla A 1 muestra el valor promedio por grupo de tratamiento y control de diferentes variables socioeconómicas en línea de base, con la muestra completa. Al igual que en la Tabla 2, podemos observar que en la mayoría de los casos la diferencia promedio entre tratamiento y control no es estadísticamente significativa. Además, el test de desbalance muestra que no existe una variación sistemática entre el grupo de tratamiento y control al 5% de significancia.

**Tabla A1:** Características promedio por grupo beneficiario en Línea de Base y test de balance.

	(1) CONTROL	(2) TRATADO	(3) DIFERENCIA	(4) P-VAL
Edad jefe de hogar (años)	46.96	45.60	-1.36	0.37
Jefe de hogar es mujer (%)	0.11	0.14	0.03	0.28
Educación jefe de hogar (años)	7.18	6.91	-0.27	0.69
Jefe de hogar con trabajo (%)	0.93	0.93	-0.00	0.94
Composición familiar:				
Menores de 6 años	0.35	0.28	-0.07	0.34
De 6 a 18 años	0.71	0.47	-0.24	0.09
Mayores de 60 años	0.33	0.28	-0.05	0.38
Nro. miembros	3.13	2.73	-0.40	0.19
Hacinamiento(hab./pers.)	1.38	1.37	-0.01	0.96
Tramos ingreso en Bs.:				
Menos de 1000	0.42	0.45	0.04	0.68
De 1001 a 2000	0.25	0.22	-0.04	0.31
De 2001 a 5000	0.24	0.24	-0.00	0.94
Más de 5000	0.09	0.09	0.00	0.94
<b>Posesión de:</b>				
Vivienda propia	0.92	0.95	0.03	0.12
Celular	0.72	0.73	0.00	0.96
Radio	0.73	0.75	0.02	0.76
Televisor	0.17	0.09	-0.08	0.15
Exprimidora	0.01	0.00	-0.01	0.14
Licuadaora	0.11	0.05	-0.06	0.21
Refrigerador	0.10	0.03	-0.07	0.13
Antena parabólica	0.04	0.02	-0.02	0.23
Computador	0.04	0.02	-0.02	0.34
Impresora	0.02	0.00	-0.02	0.12
Reproductor DVD	0.10	0.05	-0.05	0.15
Generador	0.09	0.09	-0.01	0.87

Uso en horas/día:				
Linterna	2.78	2.74	-0.05	0.80
Mechero	2.23	2.76	0.53	0.09
Focos	1.77	0.54	-1.23	0.12
Lámpara	0.11	0.10	-0.01	0.89
Celular	3.05	2.25	-0.80	0.17
Radio	7.05	7.34	0.29	0.78
Cantidad/mes:				
Velas (unid.)	12.43	8.85	-3.59	0.07
Pilas (unid.)	13.04	11.90	-1.15	0.49
Diesel (litros)	12.22	10.11	-2.12	0.73
Gasolina (litros)	16.83	16.74	-0.10	0.98
Gasto en Bs./mes:				
Velas	11.85	8.16	-3.69	0.07
Pilas	42.70	37.91	-4.79	0.30
Diesel	51.21	41.63	-9.58	0.69
Gasolina	83.29	71.80	-11.49	0.58
Otros impactos:				
Carga cel. en casa (%)	0.31	0.19	-0.12	0.11
Quemaduras por vela/mechero	0.00	0.01	0.01	0.03
Mujeres sin trabajo (en %-497 obs)	0.62	0.61	-0.01	0.83
Test desbalance:				
F				3.69
P-valor				0.08
<b>OBSERVACIONES</b>	<b>374</b>	<b>435</b>	<b>809</b>	<b>809</b>

Fuente: PERER (2017,2018)

Nota: La columna (3) muestra la diferencia en el valor promedio de los dos grupos de variables, y la columna (4) muestra el P-valor de un test de diferencia de medias implementado mediante una regresión simple entre la variable y el tratamiento, con errores estándar corregidos por clúster. El test balance se estima mediante una regresión del tratamiento sobre todas las variables, donde la hipótesis nula es que todos los coeficientes son simultáneamente 0. Este test se implementa como test de permutación.

## 6.3. Desgaste y modelo IPWn

Posterior a la intervención, se perdió un 20% de la muestra, lo que potencialmente podría sesgar los efectos estimados (sesgo por desgaste selectivo o atrición). La Tabla 2 muestra que, a pesar de la pérdida, las características observables de tratamiento y control continúan balanceadas y que no existe evidencia que muestre que las diferencias entre tratamiento y control hayan afectado sistemáticamente a la probabilidad de permanecer en la muestra (test desgaste selectivo). Sin embargo, la Tabla A 2 muestra algunas diferencias en las características de las personas que permanecieron y salieron de la muestra, es decir, hubo un cambio en la

composición de la muestra, lo que afecta a la validez externa de la evaluación. Las familias que abandonaron el proyecto son más jóvenes que las que permanecieron, con menos hijos pequeños y menos adultos mayores en el hogar. Además, tienden a tener un mayor poder adquisitivo y mayor acceso a electricidad, ya que un mayor porcentaje de estas familias posee generador, tiene más horas de uso de lámparas, pilas para linterna, mayor consumo de pilas para linterna y diésel, y menor consumo de velas. Las diferencias en todas estas variables, a excepción de las dos últimas, son estadísticamente significativas al 10%.

Tabla A2: Características promedio en línea de base por grupo que abandonó o no el proyecto.

	(1) PERMANECE	(2) SALE	(3) DIFERENCIA	(4) P-VAL
Beneficiarios (% - 809 obs.)	0.55	0.52	-0.04	0.63
Edad jefe de hogar (años)	46.31	45.22	-1.09	0.38
Jefe de hogar es mujer (%)	0.13	0.11	-0.02	0.42
Educación jefe de hogar (años)	7.04	7.18	0.14	0.70
Jefe de hogar con trabajo (%)	0.93	0.95	0.02	0.38
Composición familiar:				
Menores de 6 años	0.32	0.26	-0.07	0.22
De 6 a 18 años	0.61	0.40	-0.20	0.02
Mayores de 60 años	0.31	0.27	-0.04	0.45
Nro. Miembros	2.98	2.57	-0.41	0.01
Hacinamiento(hab./pers.)	1.35	1.50	0.14	0.09

Tramos ingreso en Bs.:				
Menos de 1000	0.44	0.41	-0.02	0.51
De 1001 a 2000	0.23	0.27	0.03	0.34
De 2001 a 5000	0.24	0.22	-0.02	0.51
Más de 5000	0.09	0.10	0.01	0.74
Posesión de:				
Vivienda propia	0.93	0.95	0.02	0.26
Celular	0.73	0.73	-0.00	0.94
Radio	0.74	0.77	0.03	0.45
Televisor	0.12	0.13	0.01	0.85
Exprimidora	0.01	0.00	-0.01	0.05
Licuada	0.08	0.07	-0.01	0.74
Refrigerador	0.06	0.06	-0.00	0.97
Antena parabólica	0.03	0.01	-0.02	0.12
Computador	0.03	0.01	-0.02	0.27
Impresora	0.01	0.00	-0.01	0.07
Reproductor DVD	0.07	0.08	0.01	0.62
Generador	0.08	0.13	0.05	0.08
Uso en horas/día:				
Linterna	2.73	2.80	0.07	0.75
Mechero	2.49	2.74	0.25	0.26
Focos	1.14	0.79	-0.35	0.41
Lámpara	0.08	0.21	0.13	0.06
Celular	2.62	2.52	-0.10	0.84
Radio	7.18	7.24	0.06	0.92
Cantidad/mes:				
Velas (unid.)	10.65	8.45	-2.20	0.14
Pilas para linterna (unid.)	7.46	7.91	0.46	0.50
Pilas para radio (unid.)	4.93	5.42	0.49	0.28
Diesel (litros)	21.10	33.08	11.97	0.22

Gasolina (litros)	16.83	16.74	-0.10	0.98
Gasto en Bs./mes:				
Velas	11.85	8.16	-3.69	0.07
Pilas	42.70	37.91	-4.79	0.30
Diesel	51.21	41.63	-9.58	0.69
Gasolina	83.29	71.80	-11.49	0.58
Otros impactos:				
Carga cel. en casa (%)	0.31	0.19	-0.12	0.11
Quemaduras por vela/mechero	0.00	0.01	0.01	0.03
Mujeres sin trabajo (en %-497 obs)	0.62	0.61	-0.01	0.83
Test desbalance:				
F				3.69
P-valor				0.08
<b>OBSERVACIONES</b>	<b>374</b>	<b>435</b>	<b>809</b>	<b>809</b>

Fuente: Encuesta PERER 2017 (Línea de Base)

Nota: La columna (3) muestra la diferencia en el valor promedio de los dos grupos de variables, y la columna (4) muestra el P-valor de un test de diferencia de medias implementado mediante una regresión simple entre la variable y el tratamiento, con errores estándar corregidos por clúster.

Se procede a estimar un modelo IPW, basado en Fitzgerald, Gottschalk & Moffit (1998). Este modelo asume desgaste en observables y bajo este supuesto, recupera el efecto esperado de la intervención para la distribución inicial de

variables observables (antes del desgaste), corrigiendo el sesgo ocasionado por cambios en su composición. El modelo a estimar es el siguiente:

$$y_{i,c,1} = \alpha_i + \beta_{IPW}T_c + \beta_2X_{i,c,0} + \beta_2y_{i,c,0} + \epsilon_{i,c,t} \quad si \quad A_{i,c}^{T_c} = 1 \#(4)$$

$$A_{i,c}^{T_c} = \begin{cases} 1, & si \quad A_{i,c}^* > \delta_0 + \delta_1X_{i,c,0} + \delta_2y_{i,c,0} + \vartheta_i \\ 0, & si \quad A_{i,c}^* \leq \delta_0 + \delta_1X_{i,c,0} + \delta_2y_{i,c,0} + \vartheta_i \end{cases}$$

Este modelo puede ser estimado en dos etapas. En la primera, estimamos la probabilidad de permanecer en la muestra que está dada por

$$P(A_{ic} = 0) = Prob(A_{ic}^* \leq \delta_0 + \delta_1X_{ic0} + \delta_2y_{ic0} + \vartheta_i)$$

utilizando un logit. En la segunda etapa, estimamos la ecuación (4) por mínimos cuadrados ponderados, utilizando como peso

$$w_{ic} = \frac{1}{\hat{P}(A_{ic} = 0)}$$

El grado de ajuste de los efectos del modelo IPW dependen de la capacidad de predecir la probabilidad de que una familia permanezca en la muestra para el seguimiento. La Tabla A 3 contiene los resultados de la primera etapa de la estimación del modelo IPW para los grupos de control y tratamiento. Esta tabla muestra el efecto marginal medio del modelo logit. Podemos observar que quienes permanecieron y abandonaron el proyecto son similares en la

mayoría de las características observables. Sólo algunas de ellas son relevantes para predecir la probabilidad de permanecer en el proyecto, a saber, el gasto en energía, la edad del jefe de hogar, el tramo de ingreso y la composición familiar. Esto denota que el sesgo por desgaste en observables es pequeño, motivo por el cual los efectos estimados por IPW no varían respecto a los efectos encontrados por los otros modelos, como se observa en la Tabla A 4.

**Tabla A3:** Efectos marginales modelo logit de la probabilidad de permanecer en el proyecto.

	CONTROL (1)	TRATADO (2)
Edad jefe de hogar (años)	-0.00303 (0.00)	0.00231* (0.00)
Jefe de hogar es mujer (%) (d)	-0.0799 (0.07)	0.0495 (0.04)
Educación jefe de hogar (años)	-0.000927 (0.00)	0.00288 (0.00)
Jefe de hogar con trabajo (%) (d)	-0.106** (0.04)	0.0553 (0.09)
<b>Composición familiar:</b>		
Menores de 6 años	-0.0951*** (0.03)	0.0422 (0.04)
De 6 a 18 años	-0.0252 (0.03)	0.00112 (0.03)
Mayores de 60 años	0.0109 (0.03)	0.000809 (0.03)
Nro. miembros	0.0606** (0.02)	-0.00880 (0.02)
Hacinamiento(hab./pers.)	0.0303 (0.03)	-0.0371** (0.02)

<b>Tramos ingreso en Bs.:</b>		
De 1001 a 2000 (d)	0.0125 (0.04)	-0.0229 (0.04)
De 2001 a 5000 (d)	0.0228 (0.05)	0.00971 (0.03)
Más de 5000 (d)	-0.0365 (0.07)	0.116*** (0.04)
Vivienda propia (d)	-0.0407 (0.05)	-0.0780 (0.05)
Uso luz eléctrica	0.00180 (0.01)	0.00302 (0.01)
<b>Gasto en Bs./mes:</b>		
Velas	0.000474 (0.00)	0.00178 (0.00)
Pilas	-0.000573* (0.00)	-0.0000581 (0.00)
<b>Observaciones</b>	<b>367</b>	<b>430</b>

Fuente: PERER 2017(Línea de base)  
Nota: errores estándar corregidos por clústers entre paréntesis.

La Tabla A 4 muestra los resultados del modelo IPW para las principales variables de resultado e impacto. Notemos que, luego de corregir las estimaciones por los cambios en composición ocasionados por el desgaste de la muestra, los resultados continúan siendo estadísticamente significativos (a excepción de las quemaduras) y se parecen en magnitud al efecto ITT estimado por OLS; confirmamos mediante un test de hipótesis que los efectos estimados por el modelo IPW y OLS son estadísticamente iguales al 10% de significancia.

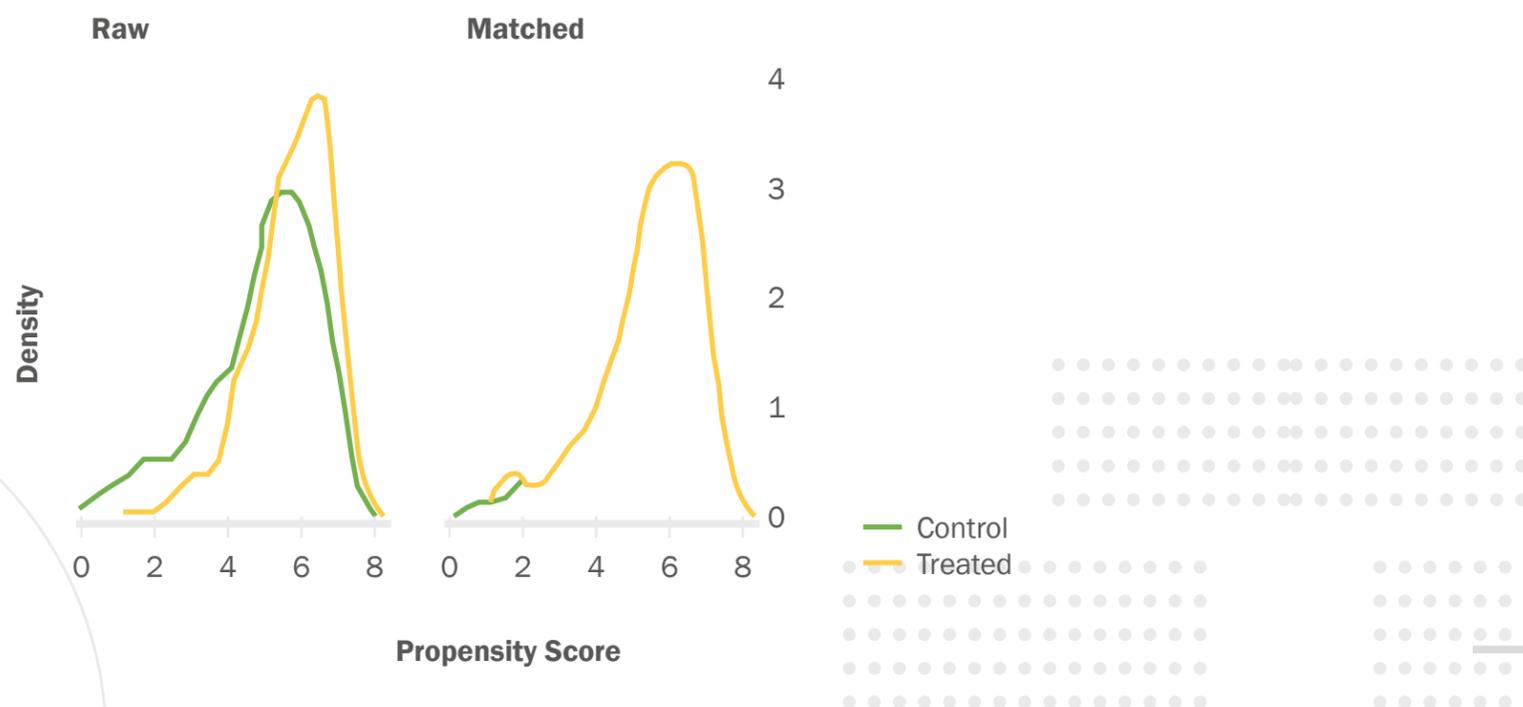
Adicionalmente, podemos observar que en todos los casos – excepto la luz eléctrica - el efecto estimado por IPW es igual o levemente mayor al efecto estimador por OLS. Esto indica que, de existir, probablemente el sesgo por desgaste selectivo es negativo y reduce el verdadero efecto promedio del tratamiento (ATE). Por tanto, el ITT es una cota inferior del efecto del proyecto.

**Tabla A4:** Efecto del Pico-sistema Fotovoltaico en variables de resultado e impacto usando un modelo IPW.

	ITT	DiD	DiD (Log)	
<b>Velas</b>				
Efecto del tratamiento	-13.250*** (2.080)	-10.460*** (2.406)	-1.286*** (0.162)	-0.453*** (0.103)
<b>Baterías</b>				
Efecto del tratamiento	-7.551*** (2.514)	-7.771** (2.754)	-0.238*** (0.068)	-0.221* (0.123)
Observaciones	687	687	687	671

## 6.4. Ajuste del matching para las estimaciones

**Ilustración 6:** Densidad Kernel modelos de Matching y Comparación de grupos.



## 6.5. Diferencia de medias en variables de resultado e impacto durante seguimiento

La siguiente tabla muestra el valor promedio de las variables de resultado e impacto luego de la implementación de los pico-sistemas fotovoltaicos, tanto para el grupo de tratamiento como el grupo de control. Como se puede ver, las diferencias promedio entre el grupo de tratamiento y control son estadísticamente significativas al 10% en la mayoría de los casos.

Estas diferencias capturan el efecto ITT sin incluir variables de control. Comparando los efectos presentados en esta tabla con los efectos descritos en el documento, se puede notar que las magnitudes no son estadísticamente diferentes. Esto muestra una vez más la robustez de los efectos estimados.

**Tabla A 5:** Diferencia de medias en variables de resultados e impacto después de la intervención.

	(1) CONTROL	(2) TRATADO	(3) DIFERENCIA	(4) P-VAL
Uso en horas/día:				
Linterna	1.82	1.42	-0.40	0.00
Mechero	1.98	0.28	-1.69	0.00
Focos	1.17	4.14	2.97	0.00
Lámpara	0.11	0.00	-0.11	0.01
Celular	2.81	2.53	-0.29	0.69
Radio	5.79	4.38	-1.41	0.11
Cantidad/mes:				
Velas (unid.)	16.67	2.42	-14.25	0.00
Pilas (unid.)	10.78	8.05	-2.73	0.08
Diesel (litros)	4.65	2.45	-2.20	0.22
Gasolina (litros)	6.86	10.04	3.18	0.19

Gasto en Bs./mes:				
Velas	15.46	1.59	-13.87	0.00
Pilas	34.61	26.09	-8.52	0.06
Diesel	19.23	9.49	-9.74	0.15
Gasolina	29.49	44.87	15.38	0.10
Otros impactos:				
Carga cel. en casa (%)	0.21	0.65	0.44	0.00
Quemaduras por vela/mechero	0.01	0.00	-0.01	0.05
Mujeres sin trabajo (en %-497 obs)	0.61	0.53	-0.08	0.24
Iluminación:				
Precio (Bs./Kl)	14.55	5.66	-8.89	0.00
Consumo(Kl)	13.54	29.24	15.70	0.00
Observaciones	315	376	691	691

## 6.6. Estimación de cantidad de consumo de energía de fuentes tradicionales rurales

En el documento mostramos el efecto de los pico-sistemas fotovoltaicos sobre el gasto en fuentes de energía tradicionales: velas y baterías. La Tabla A 6 muestra los efectos sobre la cantidad consumida de estas fuentes de energía. Consistente con los resultados de gasto, observamos una caída en la cantidad de velas y

baterías consumidas. El efecto es estimado con un modelo OLS y un modelo Poisson, ya que los datos son contables. Como se puede observar, el efecto estimado es robusto al cambio de especificación.

**Tabla A 6:** Efecto del Pico-sistema Fotovoltaico en el consumo mensual de fuentes tradicionales rurales de energía (en unidades/mes).

	VELAS			BATERÍAS		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	OLS	DD	Poisson(ME)	OLS	DD	Poisson(ME)
Efecto del tratamiento	-13.70***	-10.91***	-13.60***	-3.04***	-1.24	-3.12***
	(2.07)	(2.24)	(1.89)	(0.77)	(0.97)	(0.71)
Observaciones	681	681	681	681	681	681

## 6.7. Estimación de consumo de lúmenes

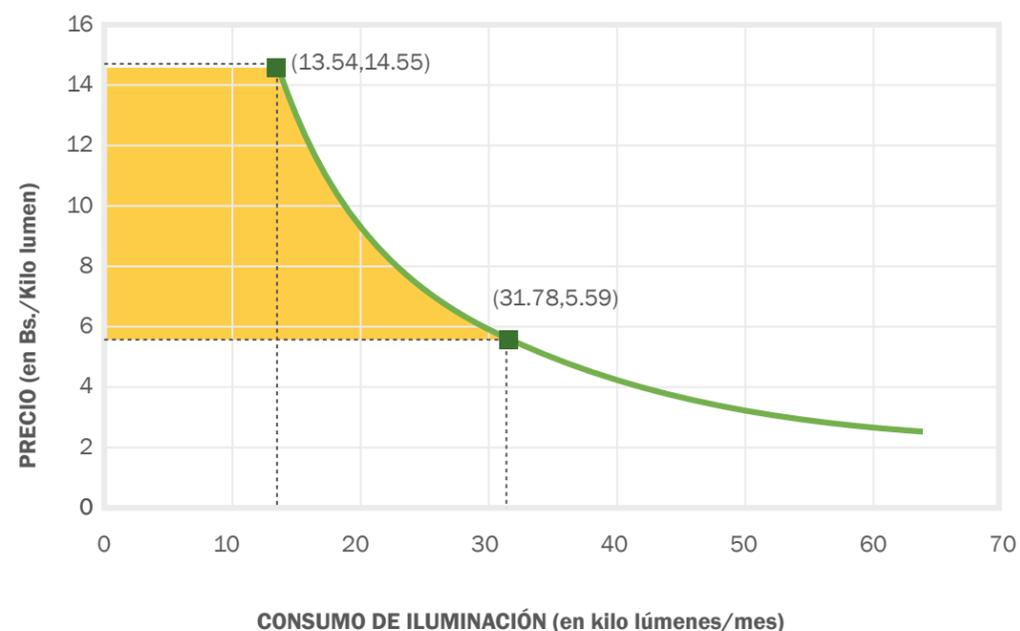
El efecto del proyecto también puede medirse por la calidad de luz que reciben los hogares al sustituir fuentes de baja intensidad, como velas, linternas y lámparas a gas, por fuentes de mayor intensidad: las lámparas LED. Para esto, se estima la cantidad total de lúmenes que consumen los hogares por mes. Un lumen es una medida de emisión de luz: las velas emiten 12,56 lúmenes por hora, las lámparas LED de 2 Watts emiten alrededor de 200 lúmenes/hora, y una linterna común, 100 lúmenes/hora. Asimismo, se puede estimar el precio promedio mensual de la iluminación, medido en bolivianos por kilo-lumen, que es el cociente entre el gasto total en fuentes de iluminación (velas, baterías y luz por pico-sistema) y el total de lúmenes consumidos por un hogar al mes<sup>16</sup>.

El siguiente gráfico muestra la variación en el precio y consumo mensual de iluminación, entre los beneficiarios y los no beneficiarios. Como se puede ver, la intervención incrementó la cantidad total de lúmenes, de 13.54 a 31.78 kilo-lúmenes/mes, y redujo el precio por kilo-lumen, de Bs. 14.55 a Bs. 5.59, es decir, con el proyecto se alcanza una mejora significativa en la calidad de luz a un menor costo.

<sup>16</sup> El costo mensual del pico-sistema es 8.07 Bs/mes,

obtenido del análisis financiero del BID (2013)

**Ilustración 7:** Cambios en la demanda mensual de iluminación.



Fuente: Elaboración propia. Figura ilustrativa elaborada a partir de resultados de Tabla A 7.

A continuación, en la Tabla A 7 se muestra el efecto estimado de las pico-lámparas sobre el precio y cantidad consumida de kilo-lúmenes. Controlando por variables socioeconómicas y el consumo de iluminación en línea de base, el consumo de iluminación mensual de un hogar

incrementó en 18.24 kilo lúmenes y el precio por kilo lumen redujo en Bs. 8.96 a causa de la intervención. El efecto estimado usando el modelo de diferencias en diferencias es levemente superior, aunque estadísticamente ambos son equivalentes.

**Tabla A 7:** Efecto del Pico-sistema Fotovoltaico en el precio y consumo mensual de iluminación (en Kilo lúmenes).

	PRECIO/KL			CONSUMO(KL)		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	OLS	DD	log-DD	OLS	DD	log-DD
Efecto del tratamiento	-8.96***	-8.69***	-1.03***	18.24***	23.33***	1.47***
	(0.90)	(1.22)	(0.19)	(1.65)	(2.13)	(0.09)
Observaciones	681	681	681	681	681	681

Es posible utilizar esta información para calcular el beneficio económico de la iluminación, que se mide mediante la Disponibilidad a Pagar (DAP); es decir, la máxima cantidad de dinero que los hogares estarían dispuestos a pagar para que, a niveles de precios anteriores a la implementación del proyecto, alcancen la cantidad de iluminación actual<sup>17</sup>. La DAP se estima como el área sombreada de la Ilustración 3, que en economía representa la variación en el excedente del consumidor de la demanda por iluminación (Banco Mundial, 2008). Si se asume una demanda de elasticidad constante, el valor de la DAP es de Bs. 179.04/mes o \$us 25.72/mes. Este valor se encuentra por encima del rango de DAP encontrado en otros estudios de electrificación rural, que oscila entre \$us 7.36 y \$us 16.16 (Banco Mundial, 2008).<sup>18</sup>

Desde el punto de vista social, el beneficio económico anual de la iluminación, que sería \$us 308.69, supera el costo de inversión de las pico-lámparas en el punto de instalación, de \$us 204. Esto quiere decir que los retornos sociales del proyecto son positivos al cabo del primer año de implementación, lo que justifica la inversión realizada.

<sup>17</sup> Este cálculo asume que las dos combinaciones de precio/consumo de lúmenes, una observada sobre el grupo de control y otra sobre el grupo de tratamiento, yacen sobre la misma curva de demanda de lúmenes. Además, suponemos que esta curva corresponde a la de una demanda de elasticidad de sustitución constante. Por tanto, los resultados de la DAP deben interpretarse con cuidado. Sirve como valor referencial, comparable con otros estudios que siguieron esta metodología; sin embargo, no identifican la verdadera curva de demanda por lúmenes, y consecuentemente la verdadera DAP, en el sentido econométrico.

<sup>18</sup> Los datos deben ser corregidos por PPP.

## 6.8. Estimación de otras variables socioeconómicas de impacto

La Tabla A 8 muestra el efecto del pico-sistema fotovoltaico sobre las horas de uso de celular. Como podemos ver, el efecto no es estadísticamente significativo, tanto para la muestra completa como para las comunidades

en las que existe señal de celular. Esto indica que, a pesar de incrementar el porcentaje de hogares que carga su celular en casa, el patrón de uso no fue afectado por el proyecto.

**Tabla A 8:** Efecto del Pico-sistema fotovoltaico en el uso de celular (en horas/día).

	TODAS LAS OBSERVACIONES		SÓLO QUIENES VIVEN EN COMUNIDAD CON SEÑAL	
	(1)	(2)	(3)	(4)
	log-OLS	log-DD	log-OLS	log-DD
Efecto del tratamiento	-0.05	0.10	-0.14	0.06
	(0.10)	(0.13)	(0.14)	(0.16)
Observaciones	674	674	443	443

La Tabla A 9 muestra el efecto del pico-sistema fotovoltaico sobre el ingreso agropecuario, variedad de cultivos y animales para crianza. Los resultados muestran que el efecto sobre el ingreso agropecuario no es

estadísticamente significativo. Por otro lado, el efecto sobre el número de cultivos y animales es estadísticamente significativo al 10%, sin embargo, la significancia desaparece en el modelo de diferencias en diferencias.

**Tabla A 9:** Efecto del pico-sistema fotovoltaico en variables agropecuarias.

	INGRESO AGROPECUARIO		NRO. CULTIVOS		NRO. ANIMALES	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	log-OLS	log-DD	log-OLS	log-DD	log-OLS	log-DD
Efecto del tratamiento	0.06	-0.09	-0.10*	-0.09	-0.10*	-0.09
	(0.34)	(0.27)	(0.06)	(0.08)	(0.05)	(0.08)
Observaciones	681	681	681	681	681	681

La Tabla A 10 muestra el efecto del proyecto sobre variables educativas en personas en edad escolar (5 a 25 años). Los resultados muestran que la asistencia escolar aumenta en

un 19% y la brecha educativa reduce en 0.01 años. Sin embargo, ninguno de estos efectos es estadísticamente significativo.

**Tabla A 10:** Efectos del pico-sistema fotovoltaico sobre variables educativas.

	TAREAS EN LA NOCHE		ASISTENCIA		AÑOS DE EDUCACIÓN		BRECHA EDUCATIVA	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	OLS	DD	OLS	DD	OLS	DD	OLS	DD
Efecto del tratamiento	0.00	0.07	0.19	0.19	-0.32	-0.47*	-0.01	-0.44
	(0.05)	(0.08)	(0.13)	(0.13)	(0.32)	(0.27)	(0.33)	(0.31)
Observaciones	244	244	421	421	419	419	235	235

# Luz para las Comunidades de la Chiquitania.

Los beneficios de la electrificación rural con energía renovable en Bolivia.



Sergio Ballon  
Soraya Román  
Katherine Antonio  
Carlos Foronda  
David Lopez-Soto  
Wilkferg Vanegas  
Michelle Hallack