

Evaluando intervenciones verdes para abastecer de agua a Lima, Perú

Costo-efectividad, impacto potencial y áreas prioritarias de investigación

Autores: Gena Gammie¹ y Bert De Bievre³

Contribuyentes adicionales al estudio: Mark Kieser², “Andrew” Feng Fang², James Klang², Joanna Allerhand², Víctor Guevara⁴, Oscar Nuñez³⁻⁴, Ayna Rodríguez⁴ y Luis Acosta³

¹ Forest Trends, 1203 19th St. NW, Washington, DC, USA

² Kieser & Associates, LLC, 536 E. Michigan Ave., Suite 300, Kalamazoo, MI, USA

³ Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina - CONDESAN, Av. La Molina 1895, Lima, Perú

⁴ Aquafondo, Avenida Chorrillos 150, Chorrillos, Lima, Perú

Proyecto de:



En colaboración con:



Con apoyo de:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Agency for Development
and Cooperation SDC

Resumen

Lima, Perú es la segunda ciudad más grande del mundo localizada en el desierto. Se destaca entre las principales ciudades de América Latina y del mundo por afrontar un estrés hídrico que podrá afectar a sus aproximadamente 9 millones de habitantes. El deterioro en la calidad y cantidad del agua amenaza el desarrollo económico de la ciudad y del Perú en general.

El suministro de agua es un desafío particular para Lima durante la estación seca, cuando los embalses, arroyos y ríos disminuyen su caudal debido a la reducida precipitación estacional.¹ A pesar de los esfuerzos en construir embalses adicionales y transportar agua desde las cabeceras en la cuenca amazónica hasta la sedienta costa del Pacífico, Lima todavía enfrenta un déficit promedio de aproximadamente 3.05 m³/s de caudal durante la parte más seca del año. En términos del volumen anual, la región experimenta un déficit aproximado de 42.84 millones de metros cúbicos (MMC) en el suministro de agua durante la estación seca.

Aunque se han planificado e implementado importantes proyectos de infraestructura física, denominada infraestructura *gris*, para abordar esta crisis, otras intervenciones de manejo de tierras, denominadas *verdes*, aún no han sido rigurosamente consideradas como parte de la solución. Este estudio tiene como objetivo sentar las bases para integrar estas opciones evaluando su costo-efectividad y su impacto potencial en diversas cuencas de Lima. Los proyectos específicos evaluados fueron seleccionados en función de su capacidad para mejorar potencialmente los caudales en la estación seca y la probabilidad de su implementación.

Este estudio evaluó cuatro de dichas posibles intervenciones en términos de costo y el potencial para mejorar el caudal base en la estación seca: 1) exclusión del ganado de los pajonales de puna actualmente sobre-pastoreados, 2) introducción de prácticas de rotación de pastoreo en los pajonales de puna actualmente sobre-pastoreados, 3) restauración hidrológica de humedales que han sido drenados y 4) restauración de la antigua infraestructura de infiltración (*amunas*).²

La evaluación encontró que las intervenciones verdes podrían contribuir sustancialmente a abordar el déficit del caudal actual en la estación seca a costos inferiores o competitivos comparado con los proyectos de infraestructura gris propuestos. La restauración de la antigua infraestructura de infiltración se destacó como una intervención verde particularmente costo-efectiva y potencialmente con un alto nivel de impacto, siendo que el aumento promedio marginal del caudal base se estima que costaría US\$85,750 por m³/s. Nuestras estimaciones indican que las cuatro intervenciones verdes tendrían un costo competitivo frente a las alternativas de infraestructura gris, ubicándose la mayoría dentro de un precio de US\$0.25/m³.

Asimismo, el análisis sugiere que si se implementan a mayor escala, estas intervenciones verdes combinadas podrían reducir el déficit del caudal base de la región en un 90% o 2.74 m³. En términos del impacto volumétrico anual, esto corresponde a 58 MMC de suministro de agua en la estación seca, más que el actual déficit en la estación seca de la región. Implementar todo el portafolio de intervenciones verdes tendría un costo estimado de US\$7.9 millones por año.

El análisis reconoce que la falta de monitoreo hidrológico histórico en la zona de estudio deja espacio para la incertidumbre en torno a varios de los supuestos utilizados en este estudio. Para dar cuenta de esto, el nivel de incertidumbre asociado a cada supuesto se asignó cualitativamente, y una gama de posibles valores promedio se utilizó para crear estimados "bajos" y "altos" de costo-efectividad y de impacto potencial. Incluso bajo nuestros supuestos más conservadores, la restauración de amunas y la restauración hidrológica de los humedales siguen

¹ La calidad del agua también es un tema crítico para las cuencas de Lima, y todo plan eficaz de gestión de recursos hídricos para la región tendría que abordar la cantidad y la calidad. Sin embargo, este estudio centró su análisis en el caudal base a fin de comenzar a estimar la contribución potencial de las intervenciones verdes para hacer frente a este importante componente del desafío.

² Los pajonales de *puna* son praderas naturales en suelos generalmente ricos en carbono, localizados a gran altura por encima de la línea de árboles en los Andes Centrales.

siendo más costo-efectivas que otras 11 intervenciones grises consideradas. El estudio también sugiere cómo el monitoreo hidrológico específico en la región podría mejorar en gran medida la comprensión del impacto de las intervenciones verdes en la región.

El enfoque metodológico utilizado en este informe para estimar los beneficios hidrológicos de las intervenciones, incluido en los anexos del presente informe junto con todos los cálculos, puede aplicarse en una variedad de contextos. Estos incluyen el análisis costo-beneficio de proyectos de inversión pública, contribuciones del sector privado a la administración del agua y el uso de un indicador cuantificable (caudal base, en este caso) para priorizar los proyectos de intervención verde que forman parte de un fondo de agua o esquema de protección.

Tabla de Contenido

Resumen	2
Contexto regional	5
Acerca de este estudio	6
Alcance	7
Métrica del beneficio hidrológico	7
Intervenciones	8
Exclusión del ganado de los pastizales naturales (ecosistemas de <i>puna</i>).....	8
Pastoreo rotativo en praderas naturales (ecosistemas de <i>puna</i>)	9
Restauración hidrológica de los humedales drenados	9
Restauración de <i>amunas</i>	9
Alcance geográfico.....	9
Metodologías de evaluación de rendimiento.....	10
Resultados.....	13
Costo-efectividad	14
Impacto potencial en el caudal base	15
Abordando la incertidumbre en el análisis	15
Discusión	17
Comparando costo-efectividad: intervenciones verdes y grises	18
Áreas prioritarias de investigación para intervenciones basadas en cuencas	19
Otras aplicaciones para las metodologías de cálculo	20
Referencias	21
Anexo 1: Documentos técnicos sobre cuantificación de beneficios de las intervenciones basadas en cuencas	21
Anexo 2: Cálculos del costo y rendimiento de las intervenciones verdes (Hoja de cálculo Excel)	21

Contexto regional

Lima, Perú enfrenta a un serio estrés hídrico, particularmente pronunciado durante los meses de la estación seca de mayo a diciembre. Durante la estación lluviosa, la región goza de un superávit de agua: los embalses están llenos y el caudal de los ríos es alto (aunque la contaminación sigue siendo un problema). Sin embargo, en la estación seca hay muy poca lluvia y, por lo tanto, hay escasez de agua en los embalses, arroyos y ríos. La Figura ilustra el carácter estacional del desafío en la cantidad de agua de la región usando al río Rímac, la principal fuente de agua de Lima.

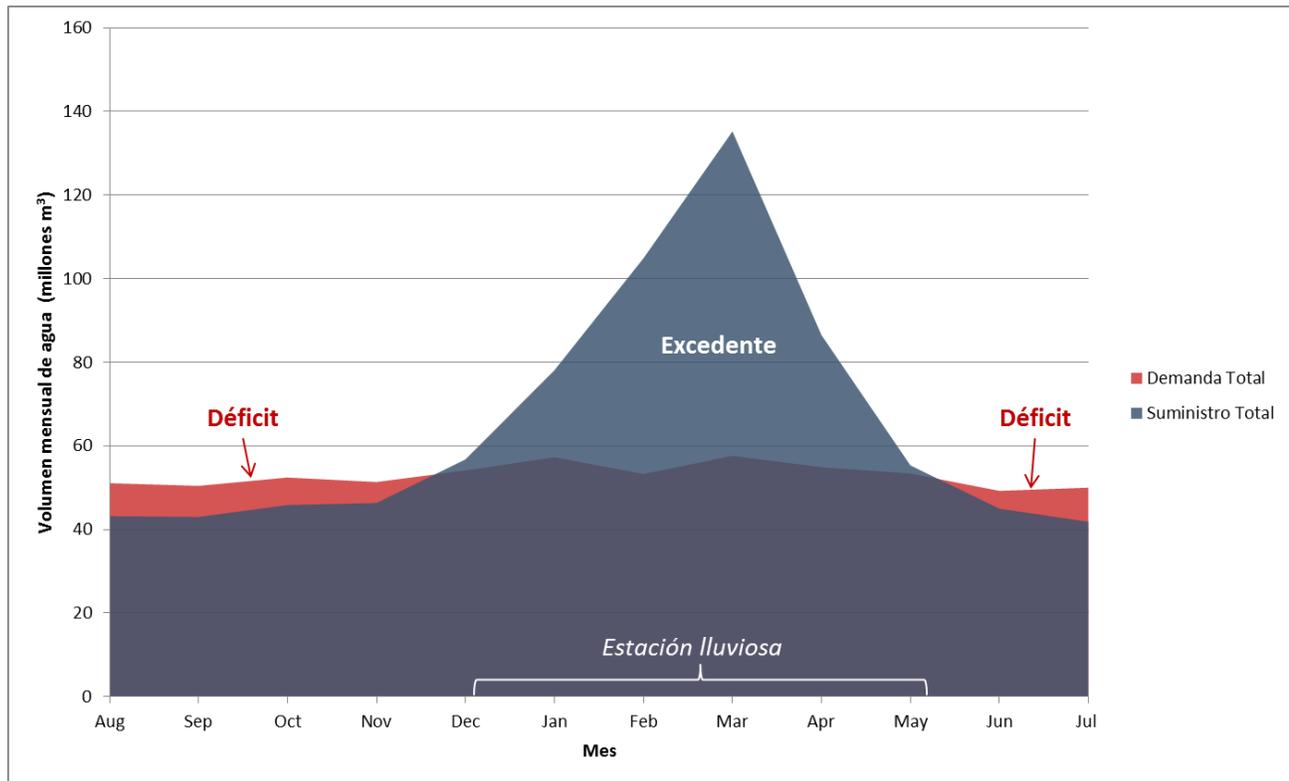


Figura 1. Suministro y demanda de agua en la cuenca del río Rímac. Fuente: Ministerio de Agricultura del Perú, 2010.

La figura anterior ilustra claramente que el suministro de agua que llega a Lima, en términos del total anual, es suficiente en cantidad para satisfacer la demanda de los usuarios del agua de la ciudad. Sin embargo, gran parte del excedente en el suministro durante la estación lluviosa fluye por la región hasta llegar al océano.

La Tabla 1 también ilustra este déficit al mostrar el excedente y el déficit (m^3/s) del caudal promedio mensual de las cuencas que abastecen de agua a Lima.³ La tabla muestra que en julio, el mes más seco para el Rímac-Alto Mantaro, el déficit del caudal promedio es de $0.86 m^3/s$. Este déficit es especialmente crítico para la población de Lima, ya que la planta de tratamiento más grande del servicio de agua de Lima, SEDAPAL, es abastecida por el río Rímac. La cuenca del Chillón experimenta incluso déficits más pronunciados en la estación seca, ya que sus caudales medios en agosto, septiembre y octubre son tan bajos que prácticamente no queda ningún caudal remanente para la planta de tratamiento más pequeña de SEDAPAL después de que se retira agua para usos agrícolas.⁴ La cuenca del Lurín, que

³ Estas tablas muestran datos que combinan las cifras del caudal para las cuencas del Rímac y Alto Mantaro. Aparte de esto, la cuenca del Alto Mantaro se excluye del alcance de este estudio, ya que sus principales contribuciones al suministro de agua de Lima se hacen desviando el agua a través de infraestructura gris.

⁴ La planta de SEDAPAL en la cuenca del Rímac tiene una capacidad operativa de $17.50 m^3/s$, mientras que la planta en la cuenca del Chillón tiene una capacidad operativa de $2.50 m^3/s$. (Nippon Koei 2012).

también abastece a la región de Lima pero de la cual actualmente SEDAPAL no toma agua, apenas satisface las demandas de suministro agrícola en los meses de la estación seca.

Tabla 1. Excedente y déficit promedio del caudal (m³/s) para las aguas superficiales de las cuencas del Chillón, Rímac y Lurín, por mes.
Fuente: Nippon Koei LAC (2011).

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Excedente (Déficit) - cuencas Rímac-Alto Mantaro	16.51	30.86	34.49	18.70	3.48	0.08	(0.86)	(0.53)	(0.55)	0.00	1.86	6.48
Excedente (Déficit) – cuenca Chillón	4.86	9.14	14.01	4.06	(0.44)	(1.49)	(2.46)	(2.50)	(2.50)	(2.50)	(2.38)	0.72
Excedente (Déficit) – cuenca Lurín	3.44	9.05	10.72	4.48	1.66	0.66	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	1.48

En términos de volumen, el déficit anual de agua es de aproximadamente 5.15 millones de m³ (MMC) para las cuencas del Rímac-Alto Mantaro y 37.67 MMC para la cuenca del Chillón, para un total de 42.84 MMC. Estas cifras corresponden a aproximadamente el 2% del excedente en la estación lluviosa para las cuencas del Rímac-Alto Mantaro, y alrededor del 44% del excedente en la estación lluviosa para la cuenca del Chillón. Los desafíos en la cantidad de agua para Lima podrían mitigarse sustancialmente si el agua que entra a las cuencas del Chillón, Rímac y Lurín (conjuntamente, "ChiRiLu") durante la estación lluviosa se almacenara por más tiempo en la cuenca - en otras palabras, si el pico en la Figura 1 disminuyera y los valles aumentarían.

Acerca de este estudio

La restauración de los procesos naturales e incluso las antiguas prácticas de infiltración en las cuencas ChiRiLu pueden mejorar la regulación de los caudales hidrológicos, ayudando a distribuir el agua excedente recibida durante la estación lluviosa para usarla durante la estación seca. Los bosques, pastizales y humedales pueden actuar como esponjas, absorbiendo el agua durante la estación lluviosa y liberándola poco a poco en el transcurso del año. Antiguas técnicas de infiltración fueron usadas en el pasado para aumentar el almacenamiento del agua y liberar lentamente el flujo que luego resurgía a la superficie en manantiales ladera abajo después de un retardo de varios meses, estas técnicas también pueden ser parte de una estrategia de paisaje. La implementación de este tipo de intervenciones verdes puede dar lugar a beneficios sociales, culturales y ambientales adicionales, ya que las comunidades aguas arriba son involucradas para apoyar al mejoramiento de la gestión de las cuencas hidrográficas y los recursos hídricos de la región y dado que los sistemas naturales también pueden filtrar

Aclarando la terminología: Infraestructura gris, infraestructura natural e intervenciones verdes

Las intervenciones de gestión de los recursos hídricos en realidad forman un espectro de estrategias que van del verde al gris, marcar una clara distinción entre infraestructura *verde* y *gris* resulta difícil y quizás innecesario. Sin embargo, es útil aclarar que al utilizar estos términos en este documento, las definiciones que tenemos en mente son las siguientes:

- **Infraestructura gris:** infraestructura convencional construida (por ejemplo, plantas de tratamiento de aguas residuales, grandes proyectos para desviar el agua de otras cuencas, tecnologías de control de contaminación industrial)
- **Infraestructura natural:** ecosistemas de cuencas - como bosques, humedales y pastizales - que proporcionan una variedad de servicios o beneficios ambientales, para la gestión de los recursos hídricos, así como la provisión de hábitat, secuestro de carbono, servicios de polinización, etc.
- **Intervenciones verdes:** una amplia gama de acciones que protegen, restauran o mejoran los ecosistemas de cuencas y/o el uso sostenible del suelo en una cuenca - por ejemplo, puede incluir acciones que reducen las amenazas a los bosques naturales, restauran los humedales, mejoran la capacidad de filtración de los pastizales, mantienen el ganado alejado de las aguas superficiales o reducen la escorrentía de nutrientes en las tierras agrícolas.

contaminantes del agua, estabilizar los suelos y proporcionar hábitat para la biodiversidad.

Este estudio caracteriza el potencial de las intervenciones verdes para reducir el déficit de agua durante la estación seca en la ciudad de Lima. Aunque la infraestructura gris, como los embalses y los proyectos de desviación también pueden ayudar a cerrar la brecha, este estudio se centra en estimar el impacto de las intervenciones verdes. Si bien, los proponentes de intervenciones basadas en cuencas a menudo señalan las contribuciones que los sistemas naturales pueden aportar a las estrategias de gestión de los recursos hídricos, el caso de las intervenciones verdes es rara vez cuantificado de manera que les permita ser comparados con otras alternativas - en particular en las economías emergentes y en desarrollo. De hecho, antes de este estudio, dicha cuantificación nunca había sido realizada para intervenciones verdes en Lima o ninguna otra región del Perú.

Estimar el beneficio hidrológico es más difícil de realizar con las intervenciones verdes en la región que con la infraestructura gris convencional, debido a la falta de datos disponibles sobre los procesos hidrológicos en estas complejas cuencas montañosas. Además, las variaciones entre regiones dificultan la extrapolación de los resultados disponibles de los pocos sitios de investigación existentes. Debido a la falta de un monitoreo exhaustivo y riguroso en la zona de estudio para largos períodos de tiempo, no se ha realizado un claro esfuerzo para estimar los beneficios hidrológicos de las intervenciones basadas en las cuencas. En ausencia de esta información, este estudio ofrece un enfoque para calcular empíricamente el beneficio potencial hidrológico de un conjunto de intervenciones verdes en términos que les permitan ser comparados con la infraestructura gris. El estudio también señala las áreas prioritarias de investigación para llenar los vacíos de conocimiento que quedan. El equipo de análisis reconoce que este estudio es sólo el primer paso hacia la producción de estimaciones sólidas, basadas en datos de todo el potencial de las intervenciones verdes para la gestión de los recursos hídricos de Lima.

Este estudio preliminar fue diseñado e implementado por un consorcio de organizaciones socias representando una singular diversidad de experiencias. Forest Trends, una organización no gubernamental con sede en Estados Unidos enfocada en usar herramientas económicas y mecanismos tipo mercado para apoyar la conservación, estuvo a cargo de diseñar y coordinar el estudio. Kieser & Associates, LLC, una firma consultora con sede en Estados Unidos, con décadas de experiencia en el diseño e implementación de programas de comercio de calidad del agua y otros programas de servicios de cuencas basados en el rendimiento, apoyó el diseño del estudio y compiló las metodologías empíricas preliminares utilizadas para calcular el rendimiento de las intervenciones verdes. Aquafondo, el fondo de agua para Lima y Callao, lideró el alcance del estudio, involucró a los principales actores y recopiló los datos locales para el análisis. CONDESAN, una organización no gubernamental centrada en el desarrollo sostenible en los Andes, añadió experiencia hidrológica regional para ayudar a adaptar las metodologías de cálculo y complementar con datos regionales confiables. La Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación financió el estudio, a través del proyecto de Forest Trends, *Aumentando la escala de las inversiones en servicios de cuencas para enfrentar la crisis mundial de agua*.

Alcance

Los parámetros primarios del alcance de este estudio fueron la métrica del beneficio hidrológico, las intervenciones y el ámbito geográfico. Cada uno de estos parámetros fue definido por el equipo de análisis con el aporte de la Autoridad Nacional del Agua y otros actores regionales.

Métrica del beneficio hidrológico

El caudal base fue seleccionado como el criterio para evaluar el rendimiento de las intervenciones verdes. El caudal base se define como la menor tasa de caudal del agua superficial en el año y se expresa en metros cúbicos por

segundo (m^3/s). Este estudio no especifica en qué punto (altura o km del río) se produce el beneficio de un mayor caudal base.⁵

Dada la carestía aguda tanto en la calidad como en el suministro del agua en la región, la selección del caudal base como el criterio de rendimiento no fue sencillo. El equipo del proyecto reconoce que futuros estudios deben evaluar el impacto de las intervenciones verdes en función de otros criterios también, incluyendo la reducción de la contaminación por nutrientes y sedimentos.

El caudal base fue seleccionado en última instancia, como el criterio meta para los beneficios hidrológicos para esta primera ronda de análisis, dada su prioridad entre los actores en toda la cuenca, en particular, la Autoridad Nacional del Agua y SEDAPAL, y el potencial de comparar la capacidad de las intervenciones verdes de aumentar el caudal base con el rendimiento de proyectos de transferencia de agua entre cuencas. El equipo también llegó a la conclusión de que, en comparación con otros indicadores, sería más factible evaluar la contribución de las intervenciones verdes a los resultados de gestión de recursos hídricos en términos del caudal base.

Intervenciones

Las cuatro intervenciones, o tipos de proyectos, evaluados en este estudio fueron seleccionadas de una lista más extensa de intervenciones preparada por Aquafondo, basada en una combinación de posibles intervenciones basadas en cuencas identificadas previamente por Kieser & Associates, CONDESAN y EfCO. Las intervenciones fueron seleccionadas sobre la base de la contribución potencial para mejorar el caudal base, la capacidad del equipo de análisis de identificar o construir una metodología para evaluar la intervención contra el indicador de rendimiento, y el interés de Aquafondo en dar seguimiento a este tipo de proyectos dentro de su portafolio de inversiones. Las intervenciones seleccionadas también fueron evaluadas según su factibilidad de implementación en la zona de estudio, dada la experiencia existente y las primeras evaluaciones de la voluntad de las comunidades aguas arriba de participar en este tipo de proyectos. Las intervenciones que se consideraron en la 'lista larga', pero excluidas del presente análisis, incluyen la reforestación, zonas de amortiguación ribereña, mejoramiento de los sistemas de riego y restauración de terrazas pre-incas. Como tal, un portafolio completo de intervenciones verdes para la zona de estudio podría incluir muchos más tipos de proyectos, y mucho mayor impacto potencial, de lo que este análisis - limitado a cuatro intervenciones - puede sugerir.

Las cuatro intervenciones seleccionadas se describen a continuación, junto con una descripción cualitativa de sus beneficios hidrológicos esperados. El Anexo 1 presenta más detalles de los documentos técnicos sobre las respectivas metodologías de cuantificación de los beneficios hidrológicos.

Exclusión del ganado de los pastizales naturales (ecosistemas de puna)

Los ecosistemas de pajonales de *puna* que existen en suelos ricos en carbono a grandes alturas en las cuencas ChiRiLu, como en la mayor parte de la sierra central peruana, son utilizados por las comunidades locales para el pastoreo del ganado y alpacas. Si bien las alpacas tienen impactos relativamente benignos sobre las propiedades hidrológicas de los suelos debido a sus acolchadas patas y su forma de cortar el pasto, el ganado compacta el suelo, causa reptación del suelo, y, dependiendo de la densidad de ganado, puede ocasionar una cobertura incompleta del pasto en el suelo. La intervención de exclusión del ganado resultaría en el cierre de estos pastizales, retirando a los animales que pastan actualmente, mediante la construcción de una barrera física o medidas de gobernanza comunal, limitando por tanto la función de estos territorios a 'zonas productoras de agua'.

El remover a los animales de la zona protegida permite al ecosistema de *puna* recuperar sus cualidades hidrológicas positivas. Los suelos compactados tienen oportunidad de descomprimirse, y la densidad aparente y capacidad de infiltración del suelo mejoran. La cubierta vegetal también tiene oportunidad de recuperarse, protegiendo el suelo y por lo tanto reduciendo la erosión. Además, la evapotranspiración del pasto puede disminuir con el tiempo,

⁵ Especialmente con respecto a las prácticas de infiltración, no se evalúa la ubicación del resurgimiento, pero está claro que esta técnica ofrece un beneficio en lugares pertinentes aguas abajo.

especialmente si el pastoreo estaba asociado anteriormente con la quema como ocurre en la mayoría de los casos, aumentando así el rendimiento de agua de la cuenca. En conjunto, estos resultados se traducen en una mejor capacidad de regulación hidrológica y reducción de sedimentos en el suministro de agua, mejorando los caudales base y la calidad del agua a nivel de sitio y, si se aplica en un área suficientemente extensa, a nivel de cuencas también.

Pastoreo rotativo en praderas naturales (ecosistemas de *puna*)

Una variante de la intervención de la exclusión del ganado, la intervención de pastoreo rotativo apoya una transición del pastoreo intensivo todo el año (o casi todo el año) a un sistema de pastoreo rotativo que permite a los ecosistemas de *puna* regenerarse durante los períodos de exclusión del ganado. Los animales pueden pastar en forma rotativa entre áreas alternas para evitar el sobrepastoreo (eliminación de la cubierta vegetal desde la raíz; compactación sustancial del suelo).

La gestión del pastoreo en forma rotativa mejora y mantiene la capacidad de los ecosistemas de *puna* para regular los caudales hidrológicos y proteger el suelo contra la erosión, a través de los mismos mecanismos de la intervención de exclusión del ganado discutida anteriormente.

Restauración hidrológica de los humedales drenados

Los humedales en las altas elevaciones han sido drenados surcando la superficie para permitir el acceso del ganado para el pastoreo. Los surcos drenan activamente la precipitación directa y el agua subterránea localizada, causando que estas fuentes de agua se pierdan rápidamente a lo largo del año y por lo tanto no contribuyan al caudal base de los arroyos.

Al eliminar los surcos, los humedales repondrán sus volúmenes almacenados, y la infiltración profunda de los procesos de regulación del agua superficial se recuperarán. A su vez, el almacenamiento superficial del agua durante todo el año se infiltrará a las aguas subterráneas poco profundas contribuyendo así al caudal base local.

Esta intervención no toma en cuenta el proceso mucho más complejo de una plena restauración ecológica de los humedales drenados, que probablemente incurriría en costos mucho más altos que los utilizados para esta intervención en este estudio.

Restauración de *amunas*

Las *amunas*, o antiguos canales de desviación, en determinadas partes altas de las cuencas de Lima históricamente transportaron el caudal de los arroyos hacia zanjas de infiltración construidas lateralmente en las laderas. El agua infiltrada resurgía en pequeñas, micro-lagunas construidas o en manantiales naturales pendiente abajo, con un retraso de varias semanas o meses. Parte de esta agua podía entonces ser usada para el riego agrícola. Con el tiempo, independientemente del tipo de lechada utilizada para impermeabilizar, el canal de desvío fracasaba. Esto daba lugar a que el agua desviada rápidamente volviera a infiltrarse cerca del punto de la desviación sólo para luego volver a entrar a la corriente donde rápidamente se perdía en el caudal superficial. Volver a impermeabilizar los canales de desviación con cemento da lugar a que todo el caudal de la corriente desviada sea acarreado a las zanjas de infiltración. Se supone que toda el agua en las zanjas de infiltración llega a las aguas subterráneas poco profundas. Después que se retira una porción del agua para la irrigación local, el agua restante recarga el agua subterránea local, contribuyendo al caudal base.

Esta intervención se limita a restaurar las *amunas* existentes, no construir nuevos canales de desviación y zanjas de infiltración, lo que sería más costoso. Este tipo de estructuras no es probable que estén generalizadas en toda la cuenca, aunque más de 30 *amunas* ya han sido identificadas en una sub-cuenca del Chillón.

Alcance geográfico

El alcance geográfico del estudio incluye las cuencas del Chillón, Rímac y Lurín, que en conjunto suministran casi toda el agua de Lima. Las cuencas de las que se desvía y transporta el agua a través o sobre los Andes hasta Lima

constituyen las cuencas restantes que abastecen a Lima. Estas cuencas no fueron consideradas en el estudio. El alcance geográfico determina el área donde se consideraron intervenciones verdes para una potencial implementación.

Estimando el costo marginal y el impacto potencial total

Este estudio evaluó en forma general cada una de las intervenciones en términos del a) costo marginal y b) impacto potencial total en los caudales base. Es de esperar que ambos pudieran mejorarse con una futura recopilación de datos, como se señala más adelante en la sección de Discusión.

El costo marginal de cada intervención se estimó dividiendo el costo total anualizado de un proyecto típico por el beneficio estimado de caudal base (o, para los valores en US\$/m³ presentados, el costo anualizado fue dividido por la contribución volumétrica a los caudales en la estación seca durante un año). Los costos del proyecto incluyen estimaciones de los materiales y mano de obra directa, así como la gestión del proyecto (incluyendo la participación comunitaria y el control de calidad). Debido a que casi todos los costos considerados eran costos iniciales incurridos en el primer año de un proyecto, los costos futuros no fueron descontados. Todos los costos que se presentan en este estudio son, en términos de dólares estadounidenses.⁶

El impacto potencial total de cada intervención se estimó multiplicando el beneficio típico del caudal base a nivel de proyecto por el número total estimado de proyectos de tamaño típico en las cuencas ChiRiLu. Es importante señalar que este impacto potencial total representa una estimación preliminar, del extremo alto de los beneficios para toda la región ChiRiLu, asumiendo que las intervenciones se implementan en todo su potencial de escala. Este análisis actualmente no es capaz de estimar el impacto potencial en un punto particular de la cuenca, por ejemplo las tomas realizadas por SEDAPAL.

Para muchos de los supuestos utilizados en el estudio, el equipo de análisis identificó los valores desfavorables, favorables y la ‘mejor estimación’ para representar el valor promedio entre todos los proyectos potenciales para cada intervención.⁷ Estos rangos fueron creados para dar cuenta de las incertidumbres inherentes al análisis, donde no se cuenta localmente con un monitoreo hidrológico histórico y amplio. Es importante tener en cuenta que la variación en estos valores no es debido a la variación inevitable de valores para proyectos específicos en la región, sino más bien debido a la incertidumbre en torno al *valor promedio* para todos los proyectos potenciales en la región.

Los rangos de valores no se utilizaron para dar cuenta de la incertidumbre en torno a la capacidad de los desarrolladores de proyectos de implementar todos los proyectos potenciales, por ejemplo, debido a la falta de interés por parte de las comunidades aguas arriba.⁸ Como resultado, las cifras del *impacto potencial total* citadas en este informe reflejan la implementación a plena escala. Los análisis futuros pueden considerar un rango de valores para reflejar la incertidumbre en torno a las tasas de participación, si la meta es estimar el impacto potencial más probable, en lugar del *impacto potencial total*.

Metodologías de evaluación de rendimiento

El potencial de rendimiento hidrológico de un proyecto típico para cada intervención verde se estimó utilizando cálculos adaptados de programas agrícolas y mercados acreditados de servicios de cuencas en los Estados Unidos, así

⁶ Cuando los costos se convirtieron de soles peruanos (PEN) a USD, el tipo de cambio usado fue 2.8 PEN = 1 USD.

⁷ En general, los valores más altos relativos al rendimiento eran más favorables, mientras que los valores más altos relativos a los costos eran desfavorables.

⁸ En todos menos uno de los casos, esto significa que el área potencial de aplicación fue consistente en los cálculos desfavorables, favorables y de ‘mejor estimación’. En la excepción, restauración de *amunas*, el número potencial total de *amunas* que podría ser restaurado fue variado, para reflejar la incertidumbre significativa en torno al número de *amunas* existentes que se pudieran restaurar.

como información local cuando fue posible. La clara ventaja de este enfoque es que permite al análisis estimar los beneficios de las intervenciones verdes antes de que se pueda llevar a cabo un programa de monitoreo amplio para describirlos de forma más precisa. Debido a los limitados insumos de datos e investigación sobre determinadas dinámicas hidrológicas de la zona de estudio, los resultados de estos cálculos son datos en bruto como es de esperar y erran del lado más conservador (beneficio limitado) de los potenciales resultados. Estas estimaciones en orden de magnitud o mejores estimaciones ofrecen una base para priorizar las inversiones en la cuenca, además de permitir al equipo evaluar la sensibilidad de las estimaciones de rendimiento dentro de rangos de incertidumbre - ayudando a determinar dónde podrían enfocarse más eficazmente los esfuerzos de monitoreo/investigación en la región.

Las metodologías de cálculo para estimar los beneficios del caudal base asociados con cada intervención se resumen en este documento; descripciones más detalladas se pueden encontrar en los documentos técnicos preparados por Kieser & Associates, incluidos en el Anexo 1 de este informe. Los cálculos en sí, así como los valores de los datos, fuentes y evaluaciones cualitativas de la incertidumbre, están disponibles en el Anexo 2 de este informe.

Exclusión del ganado y pastoreo rotativo en praderas naturales

Como se señaló en la sección del alcance, clausurar los pastizales para el pastoreo e introducir el pastoreo rotativo en los pajonales de *puna* igualmente mejora la capacidad de regulación hidrológica de la zona, en diversos grados. Por lo tanto, se preparó una metodología para estimar el rendimiento de cada una de estas intervenciones.

En ambas intervenciones, una ecuación de masa para la cuenca se aplica para estimar la mejoría en el caudal base. El aumento del caudal base se determina por las diferencias en las estimaciones de las condiciones de antes y después usando la ecuación donde el caudal base es igual a las precipitaciones en la estación seca menos las pérdidas asociadas con la evapotranspiración, más los cambios en la humedad del suelo y las aguas subterráneas profundas y poco profundas, tomando en cuenta los caudales de entrada y salida de la zona de la intervención. La capacidad de humedad del suelo está influenciada por la densidad aparente del suelo, el contenido de carbono orgánico y el contenido de fibra vegetal.

La diferencia entre la exclusión del ganado y las intervenciones de pastoreo rotativo se refleja en los aportes de datos representado las condiciones del suelo y la vegetación en las praderas en proyectos típicos de cada tipo de intervención.

Restauración hidrológica de humedales drenados

Un cálculo conservador del aumento del caudal base se logra con un simple cálculo del balance de masa para la profundidad de la precipitación anual (o la lluvia de la estación seca) en metros multiplicado por la superficie de los humedales restaurados (m^2) menos la evapotranspiración. Esto sólo asume la precipitación directa como fuente de agua para el humedal, sin considerar el aumento de los niveles locales de las aguas subterráneas y las contribuciones relacionadas asociadas con la eliminación de la zanja artificial. Los volúmenes adicionales se pueden calcular por año o por meses de la estación seca. Dividiendo el número de segundos durante cualquiera de los períodos rinde los m^3 /segundo de caudal base. El supuesto aplicado es que el agua infiltrada se convierte en parte de la recarga de las aguas subterráneas que contribuye directamente a la corriente del caudal base. El agua superficial que recarga las aguas subterráneas ya no se pierde rápidamente por el drenaje superficial.

Restauración de las amunas

La estimación de los beneficios de caudal base a partir de la restauración de las amunas se calcula utilizando una sencilla ecuación de balance de masa de agua. El canal de desviación restaurado, previamente no utilizado, transporta continuamente el exceso de agua de un arroyo durante la estación lluviosa. La intervención impermeabiliza el canal, por lo cual éste transporta el agua directamente hasta el punto donde está destinada a infiltrarse. Por lo tanto, la cantidad de agua que se asume que se infiltra en las aguas subterráneas está determinada por la capacidad de caudal del canal y por la disponibilidad de exceso de agua en la corriente (es decir, la duración de la estación lluviosa).

Se incluye un factor de corrección para las pérdidas por evapotranspiración y el uso local del caudal aguas arriba. El cálculo de beneficios de caudal base asume que el agua infiltrada contribuirá en algún lugar al caudal base del río aguas abajo, y que los retardos de tiempo son lo suficientemente largos para abarcar de la estación lluviosa a la seca.

Costos

El análisis se benefició de la experiencia regional con las intervenciones consideradas, sobre todo en la estimación de los costos. En particular, el ahora extinto programa público PRONAMACHCS tuvo experiencia con las cuatro intervenciones en la región ChiRiLu, más o menos entre los años 2000-2011. AgroRural, la agencia pública que implementó estos programas, compartió generosamente los costos directos reales de la implementación de proyectos, lo cual fue la base de nuestras estimaciones de costos para las intervenciones de gestión de pastizales y restauración de humedales. La ONG Alternativa también compartió los costos reales de un proyecto de restauración de *amunas*, que también fue utilizado en nuestros cálculos.

Además de los costos directos de materiales y mano de obra, los cálculos incluyen los costos estimados de la participación comunitaria, el monitoreo y el control de calidad de dichos proyectos. Dado que muchos proyectos (en el caso de las intervenciones de pastoreo, con un promedio de 10 ha cada una) podrían implementarse en tierras controladas por una sola comunidad, y dado que el monitoreo y el control de calidad son posiblemente ejecutados a través de muestreo, estos costos se estimaron al nivel comunitario y divididos entre el número promedio estimado de proyectos que podrían llevarse a cabo con una comunidad, para cada tipo de intervención.

Los cálculos no reflejan la compensación directa por los costos de oportunidad, como es de esperar en los pagos tradicionales de un proyecto de servicios ambientales. La razón de ello es que se asume que las intervenciones serán implementadas de manera que generarán suficientes retornos económicos e hidrológicos a la comunidad para incentivar su participación. Por ejemplo, la experiencia de los proyectos piloto de Aquafondo y los servicios de extensión agrícola regional muestran que muchas prácticas ganaderas en la región de ChiRiLu son extensivas e ineficientes, de manera que las prácticas de pastoreo rotativo, combinadas con asistencia técnica para mejorar los rendimientos por animal, pueden a la vez reducir la huella de estas actividades y aumentar la rentabilidad económica de los miembros de la comunidad. Por otra parte, en muchos casos, la propia comunidad puede beneficiarse al mejorarse la capacidad de la cuenca para regular los caudales hidrológicos, y el aumento de los caudales en la estación seca, podría ser suficiente para incentivar el cambio de comportamiento requerido. Este es en gran parte el caso, por ejemplo, de un proyecto piloto de Aquafondo en la comunidad de Huamantanga en la cuenca del Chillón, donde las mejoras en los caudales base que se espera resulten de una mejor gestión de los pastizales y la restauración de *amunas*, es el principal motivador para la participación de la comunidad en el proyecto. Los análisis futuros pueden considerar el potencial de compartir el costo de estas intervenciones que generan beneficios locales importantes, lo que disminuiría aún más el costo de implementar el proyecto para los usuarios aguas abajo.

Área de aplicación

La altitud, tipo de ecosistema, pendiente y uso del suelo se consideraron en la estimación del *área potencial total de aplicación* de cada tipo de intervención dentro de las cuencas ChiRiLu. Esta área tiene la finalidad de sugerir la mayor extensión potencial de aplicación, y por lo tanto no toma en cuenta factores como la disposición de las comunidades o propietarios particulares de participar realmente en un proyecto. Como resultado, estas estimaciones de áreas de aplicación son probablemente más altas de lo que un programa de inversión en cuencas probablemente podría lograr. Sin embargo, permite al estudio comenzar a entender el potencial de escala de cada una de las intervenciones consideradas.

El área de aplicación para cada intervención se vio limitada por la condición de que las áreas 'asignadas' a cada intervención no podían superponerse, o sea, no podían contarse dos veces. Esto es particularmente importante ya que las cuatro intervenciones consideradas en este estudio no podían llevarse a cabo al mismo tiempo en el mismo terreno. La consideración primordial en la prevención del doble conteo en relación con las intervenciones de conservación de pastos. En este estudio, se estimó que del total de área de *puna* en las cuencas ChiRiLu, 50,506 ha, un 80% se asume que está actualmente sobre-pastoreado y por lo tanto potencialmente podría mejorarse a través de

una de las dos intervenciones discutidas aquí. De ese 80% (40,405 ha), el 30% se asume que constituye el área potencial total de aplicación de la *exclusión del ganado* (12,121 ha), y el 70% fue asignado al área potencial total de aplicación del *pastoreo rotativo* (28,283 ha).

El número potencial total de proyectos se estimó sobre la base del área potencial total estimada de aplicación en la cuenca y el tamaño estimado del proyecto promedio, para cada intervención. La Tabla 2 presenta estas cifras.

Tabla 2. Área potencial de aplicación para cada intervención verde

	Área potencial de aplicación	Número de comunidades con las que la intervención podría implementarse
Exclusión del ganado de los pajonales de puna	12,121 ha	50
Pastoreo rotativo en los pajonales de puna	28,283 ha	50
Hidrología restaurada en los humedales	1,268 ha	20
Restauración de antiguos canales de desviación	25-75 canales	4-8

Resultados

El análisis concluye que las intervenciones verdes consideradas en este estudio tienen un importante potencial para reducir drásticamente el déficit del caudal base de Lima a un costo muy razonable.

La Figura 2 resume los hallazgos del estudio en la forma de una curva de costos. La anchura de cada columna corresponde al impacto potencial total del caudal base, en términos de metros cúbicos por segundo. La altura de cada columna corresponde al costo marginal promedio de cada intervención, en términos de millones de dólares por unidad de incremento del caudal base.

La restauración de *amunas* se destaca como una intervención verde particularmente costo-efectiva y potencialmente de alto impacto, siendo un orden de magnitud menos costosa que la siguiente intervención más costo-efectiva, la restauración de humedales, y potencialmente cerrando alrededor del 40% de los 3.05 m³/s de déficit del caudal base regional (ver la sección “Contexto regional”). La restauración hidrológica de los humedales también se identifica como una intervención costo-efectiva, aunque nuestros cálculos arrojan una estimación mucho más baja del impacto potencial total en una implementación a plena escala.⁹ Las dos intervenciones de mejoramiento de la gestión de pastos en los pajonales de *puna* sugieren un gran potencial para el impacto a escala, de 1.44 m³/s en conjunto y bajo una plena implementación, aunque los costos promedio estimados son aproximadamente de un orden de magnitud mayor que la restauración de humedales.

Bajo una plena implementación – o sea, si se implementara cada proyecto potencial para cada intervención - el análisis sugiere que estas cuatro intervenciones verdes podrían mejorar el caudal base en 2.74 m³/s, lo que equivale al 90% del déficit del caudal base de Lima (3.05 m³/s), a un costo total de US\$7.9 millones por año.¹⁰ La implementación de sólo las tres intervenciones más costo-efectivas a plena escala se estima que reduciría el déficit en la estación seca en un 62%, a un costo aproximado de US\$2.1 millones por año.

⁹ Como se discute en la sección sobre el impacto potencial total a continuación, una parte de esto puede ser debido a que la metodología de cálculo para la restauración de humedales es conservadora, no toma en cuenta ningún beneficio hidrológico que podría derivarse de la infiltración de aguas subterráneas poco profundas. El área de aplicación potencial para la restauración de humedales es también mucho menor que, por ejemplo, las intervenciones de pastoreo.

¹⁰ Nuestros cálculos conservadores bajo una plena implementación colocan el impacto potencial total en 0.9 m³/s (29% del déficit) y los costos en US\$10.7 millones por año. Nuestras estimaciones favorables bajo una plena implementación colocan el impacto potencial total en 9.43 m³/s (309% del déficit) y los costos en US\$6.3 millones por año.

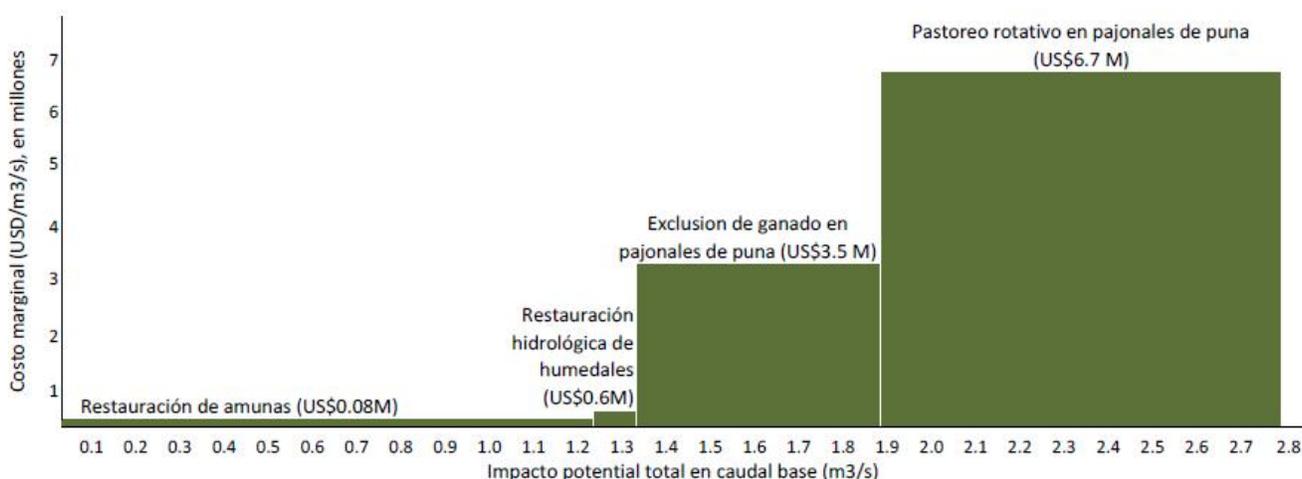


Figura 2. Curva de costos de las intervenciones verdes para mejorar el suministro de agua en la estación seca en Lima.

Quizá bajo un escenario de implementación más realista en el que se realiza uno de cada cuatro proyectos potenciales en cada intervención, reflejando la variabilidad en las tasas potenciales de participación, el portafolio de intervenciones verdes podría reducir el déficit del caudal base en $0.69 \text{ m}^3/\text{s}$, o 23%, a un costo aproximado de US\$2 millones por año.

Costo-efectividad

Como se ilustra en la Figura 2, la evaluación encontró que la restauración de *amunas* es excepcionalmente costo-efectiva. La mejoría de unidad promedio del caudal base (m^3/s) con la restauración de *amunas* se estima en un costo de US\$85,750. El análisis encuentra que la restauración hidrológica de los humedales es la segunda opción más costo-efectiva, donde los aumentos promedios de caudal base son aproximadamente diez veces más costosos que la restauración de *amunas*. Nuestras estimaciones colocan a la exclusión del ganado de los pajonales de *puna* y el pastoreo rotativo en 5 y 8 veces más costosos que la restauración hidrológica de los humedales, respectivamente. La Tabla 3 resume estos resultados.

Estas evaluaciones de costo-efectividad no muestran, sin embargo, el potencial de compartir costos en la implementación del proyecto. Como se mencionó anteriormente, estas intervenciones se asume que ofrecen importantes beneficios económicos a las comunidades aguas arriba; de hecho, la experiencia existente con estas intervenciones ha sido motivada precisamente por estos beneficios de desarrollo rural. Los potenciales ingresos de los productores aguas arriba podrían ayudar a sufragar los costos iniciales de estas intervenciones; tales acuerdos podrían disminuir significativamente el costo marginal de las mejoras resultantes del pastoreo rotativo, por ejemplo.

Tabla 3. Estimaciones del costo por unidad de incremento del caudal base ($\text{USD}/\text{m}^3/\text{s}$) para cuatro intervenciones verdes

	USD/m³/s
Restauración de amunas	\$85,750
Restauración hidrológica de los humedales	\$661,948
Exclusión del ganado de los pajonales de puna	\$3,457,033
Pastoreo rotativo en los pajonales de puna	\$6,695,636

Impacto potencial en el caudal base

El impacto potencial total en el caudal base de estas cuatro intervenciones a plena escala es considerable, reduciendo 90% del déficit del caudal base de Lima bajo nuestra mejor estimación, con una contribución potencial total de 2.74 m³/s. En términos del impacto volumétrico anual, esto se traduce en una mejor estimación de más de 58 millones de metros cúbicos de caudal en la estación seca. La restauración de *amunas* tiene el mayor impacto potencial en el caudal base, igual a 1.2 m³/s.

Tabla 4. Impacto potencial de las intervenciones verdes a plena escala, caudal base (m³/s) y suministro de agua en la estación seca (m³)

Intervención	Impacto potencial en el caudal base (m ³ /s)	Impacto potencial – suministro de agua en la estación seca (millones de m ³)
Restauración de amunas	1.22	25.9
Restauración hidrológica de los humedales	0.09	1.9
Exclusión del ganado de los pajonales de puna	0.58	12.3
Pastoreo rotativo en los pajonales de puna	0.86	18.1
Total	2.75	58.2

La contribución potencial de la gestión de pastos es también significativa, en conjunto la exclusión del ganado y el pastoreo rotativo se estima que contribuyen a una mejoría potencial del caudal base de 1.44 m³/s bajo una plena implementación. Entre los dos, se estima que el pastoreo rotativo tiene un impacto potencial mayor, a pesar de su menor impacto promedio estimado a la escala de proyecto. La diferencia en la escala se debe principalmente al área mucho mayor asignada como área potencial de aplicación para el pastoreo rotativo en comparación con la exclusión del ganado, ya que se asume que las comunidades aguas arriba probablemente estarían más susceptibles a introducir prácticas de pastoreo rotativo, lo cual requeriría menos cambios significativos en sus medios de vida.

El impacto potencial de la restauración hidrológica de los humedales drenados es bastante reducido. Sin embargo, debe ser señalarse claramente que esto podría no reflejar la realidad debido al conservacionismo de la metodología empleada para estimar los beneficios de caudal base de la restauración de las cuencas hidrográficas. Como se discutió en el documento técnico para esta intervención (ver Anexo 1), la metodología no capta la dinámica hidrológica entre los humedales restaurados y la recarga de aguas subterráneas poco profundas, lo que sumaría significativamente al beneficio hidrológico estimado de esta intervención. Este elemento de beneficio hidrológico no se considera en la metodología de cálculo, ya que se consideró que era particularmente específica para cada sitio.

Abordando la incertidumbre en el análisis

Los vacíos significativos en datos y conocimiento en la zona de estudio obligaron al análisis a complementar los datos monitorizados con la opinión de expertos para varios supuestos utilizados en los cálculos. Para dar cuenta de la incertidumbre creada por estos vacíos en datos y conocimiento, el análisis incluyó rangos de valores para la mayoría de los supuestos que reflejan los extremos conservadores y favorables de los potenciales valores promedio, y por lo tanto se produjeron estimaciones conservadoras y favorables para todas las cifras discutidas en este informe. Estos rangos de valores y los rangos resultantes de costo-efectividad, impacto potencial y demás se presentan en mayor detalle en el Anexo 2.

La Tabla 5 presenta los supuestos utilizados en nuestro análisis, junto con una puntuación cualitativa de la incertidumbre asociada a cada uno. Como muestra la tabla, existen algunos vacíos obvios en los datos - incluyendo la variabilidad espacial de la lluvia o las características de retención de agua del suelo - los cuales se podrían reducir significativamente con mediciones de campo.

Aparte de estos vacíos en los datos, la incertidumbre ocurre en algunos de los aspectos más complejos de la dinámica hidrológica en las cuencas ChiRiLu. El retardo del tiempo entre la retención de la lluvia en la estación lluviosa y la liberación en el caudal base, por ejemplo, no está bien comprendido en la zona de estudio. En relación con esto, la

dinámica de las aguas subterráneas, incluyendo la infiltración al suelo poco profundo o la geología más profunda, tampoco está bien comprendida en las complejas cuencas de montaña consideradas en este estudio. Dado que estas intervenciones “trabajan” disminuyendo la velocidad del caudal, de tal manera que el exceso de agua en la estación lluviosa esté disponible en la deficiente estación seca, la comprensión de este retardo de tiempo y la dinámica asociada de las aguas subterráneas es un área clave para mayor investigación.

Tabla 5. Supuestos en los cálculos de costo y rendimiento de las intervenciones verdes, con evaluaciones cualitativas de la incertidumbre.

Nivel de incertidumbre	Variable	Comentarios
Alto	Número de curva, con y sin proyecto	Factor que estima el escurrimiento superficial de las intervenciones de gestión de pastos
Alto	Relación entre la humedad del suelo y los caudales base	Para las intervenciones de gestión de pastos
Alto	Porcentaje de agua “perdida” por la agricultura aguas arriba, evapotranspiración, etc.	“Factor C” para la restauración de amunas
Alto	Número de amunas abandonadas que podría ser restauradas adecuadamente	Estimado del área de aplicación potencial para la restauración de amunas
Medio	Número estimado de comunidades donde podrían implementarse proyectos	Para todas las intervenciones
Medio	Participación de la comunidad y costos de monitoreo del cumplimiento (para una comunidad)	Para todas las intervenciones; no incluye el monitoreo hidrológico avanzado
Medio	Total de años de duración, proyecto típico (todas las intervenciones)	
Medio	Carbono orgánico del suelo - con y sin proyecto	Para las intervenciones de gestión de pastos
Medio	Relación entre el aumento de Carbono orgánico del suelo y la humedad del suelo	Para las intervenciones de gestión de pastos
Medio	Densidad aparente del suelo y profundidad	Para las intervenciones de gestión de pastos
Medio	Área total de aplicación potencial	Para todas las intervenciones
Medio	Promedio de descarga en estación lluviosa del canal de desviación a la zanja de infiltración	Para la restauración de amunas
Bajo	Costos directos de implementar un proyecto (todas las intervenciones)	Procedente de proyectos reales
Bajo	Precipitación anual, estación lluviosa y estación seca	Valores mantienen la variación para reflejar las diferencias de año en año
Bajo	Número de días de la estación lluviosa y la estación seca por año	

Para hacer frente de forma transparente a la incertidumbre en el análisis, se asumieron supuestos conservadores y favorables junto con nuestras mejores estimaciones de los valores promedio, creando estimaciones correspondientes para todos los resultados presentados en este estudio. Basándonos en estos rangos, podemos evaluar la sensibilidad de nuestros resultados ante la incertidumbre en torno a nuestros supuestos.

En general, el supuesto donde los variantes valores conservadores favorables tienen el mayor impacto es la precipitación. Sin embargo, esta variación refleja más un *riesgo* de menor efectividad de la intervención debido a una estación lluviosa seca, en lugar de una incertidumbre en torno a las tasas históricas de precipitación. Debido a que estas intervenciones funcionan reduciendo el pico de los hidrogramas de estas cuencas a fin de mantener a flote el

caudal base, una estación lluviosa seca necesariamente hará que sean menos eficaces, en m^3 o m^3/s , en términos de mejorar los caudales en la estación seca.

Otro supuesto clave cuya variación afecta significativamente todas las intervenciones es la duración del proyecto. En la medida en que un proyecto puede extender la cantidad de años que la participación comunitaria inicial y la aplicación de materiales durarán, antes de que los esfuerzos deban ser re-iniciados, los proyectos serán proporcionalmente más costo-efectivos. Este elemento indica la importancia central de garantizar la sostenibilidad social del programa y de monitorear y comunicar los beneficios aguas arriba a los miembros de la comunidad, a fin de asegurar un apoyo continuo a los proyectos al transcurrir el tiempo.

Entre las cuatro intervenciones verdes, la restauración de *amunas* tiene el mayor factor de diferencia entre las estimaciones favorables y desfavorables del impacto potencial total: la estimación del extremo alto es 18 veces mayor que la estimación del extremo bajo. Las áreas de incertidumbre que contribuyen a esta variación incluyen las características al nivel de sitio, como la cantidad de agua que fluye a través del canal en la estación lluviosa y la cantidad de agua infiltrada que se perdería por evapotranspiración y las tomas aguas arriba (por ejemplo, para la agricultura), así como una significativa incertidumbre en torno al número de canales de *amunas* no operativos que podrían ser adecuadamente restaurados en esta región.

También existe una variación significativa en la intervención de pastoreo rotativo, donde la estimación favorable del impacto potencial es casi 12 veces mayor que la estimación desfavorable. La variación es menor en la intervención de exclusión del ganado, donde la estimación favorable es aproximadamente 5 veces mayor que la estimación desfavorable. La principal fuente de incertidumbre en particular de estas intervenciones es la respuesta de los pajonales de *puna* al mejoramiento de la gestión, en particular en lo que se refiere a la reducción de la escorrentía. Los experimentos de campo monitoreados ayudarán significativamente a reducir la incertidumbre en torno a estas dinámicas y por lo tanto reducir la variación en las estimaciones finales.

Para la restauración de humedales el rango de las estimaciones del beneficio total del caudal base potencial que hemos producido varían menos que todas las demás intervenciones, siendo la estimación favorable sólo 1.5 veces más que la estimación desfavorable. Sin embargo, dada la naturaleza muy conservadora de la metodología de cálculo utilizada en este caso, consideramos que hay una significativa incertidumbre del beneficio hidrológico de esta intervención, que podría mejorarse mediante mediciones específicas a nivel de sitio en los posibles sitios de restauración de humedales.

Discusión

Este estudio sienta las bases para mayor consideración de las intervenciones verdes como parte de una estrategia para hacer frente a la escasez de agua en la ciudad de Lima. Una ventaja clara de producir estimaciones de los costos en términos de rendimiento del caudal base es la capacidad de comparar, en iguales términos, las intervenciones verdes frente a la infraestructura gris convencional siendo considera (o en curso) para abordar el déficit de suministro de agua de Lima. Mientras que la capacidad de comparar alternativas verdes y grises en términos de costo-efectividad es una contribución crítica al paradigma actual de toma de decisiones para la gestión de los recursos hídricos, también sugerimos que otros criterios que están más allá del alcance de este estudio - como la gestión de riesgos o el aumento de la resiliencia del sistema hídrico – deben considerarse dentro del panorama completo.

Más allá de la aplicación más clara de este estudio como un paso inicial para una sólida consideración de las intervenciones verdes dentro de las estrategias regionales de gestión de los recursos hídricos, el análisis y la metodología pueden ser útiles para los investigadores, el sector privado y una variedad de organismos públicos. Mediante la identificación de las necesidades y vacíos en los datos para evaluar estas intervenciones verdes en la región de Lima, este estudio también ofrece una guía importante para los investigadores de las agencias gubernamentales, instituciones académicas y centros de investigación, al identificar grandes vacíos de datos que crean la mayor imprecisión en las estimaciones del rendimiento hidrológico. Además, sugerimos que el enfoque metodológico aplicado en este estudio, y detallado en el Anexo 1, puede ser útil para una variedad de otras

aplicaciones, potencialmente incluyendo el análisis de costo-beneficio de proyectos de inversión pública, contribuciones del sector privado a la administración del agua, y el uso de una métrica cuantificable (caudal base en este caso) para priorizar los proyectos de intervención verde como parte de un fondo de agua.

Comparando costo-efectividad: intervenciones verdes y grises

Las estrategias actuales para aumentar el suministro de agua para la ciudad de Lima dependen casi totalmente de la infraestructura gris. Estos proyectos incluyen proyectos de desviación que traen el agua sobre y a través de los Andes hasta la costa del Pacífico, e incluso una planta de desalinización en curso. En comparación con estos proyectos de infraestructura gris, las intervenciones verdes consideradas en este estudio son competitivas en términos de costo, y nuestras mejores estimaciones colocan a todas las intervenciones dentro del precio de US\$0.74/m³ de la planta de desalinización de agua de mar.¹¹ La restauración de amunas y la restauración hidrológica de los humedales son más costo-efectivas que cualquier intervención gris considerada, incluso bajo nuestros supuestos más conservadores.

La Tabla 6 resume la variedad del precio estimado en este estudio para las cuatro intervenciones verdes en términos de la contribución volumétrica a los caudales durante la estación seca en un año (USD/m³). Estas cifras se comparan con los costos comparables por metro cúbico de la infraestructura gris considerada en un estudio reciente elaborado para aportar información a la planificación de gestión integrada de los recursos hídricos de Lima, presentados en la Figura (Nippon Koei 2011).

La Figura 4 ilustra cómo las intervenciones verdes consideradas en este estudio se comparan con once proyectos de infraestructura gris, en términos de costo marginal. Las intervenciones verdes están clasificadas por su valor de ‘mejor estimación’, aunque los valores favorables y desfavorables también se muestran en la barra apilada. La figura muestra claramente que todas las ‘mejores estimaciones’ de costo-efectividad de las intervenciones verdes las colocan muy por debajo del precio de US\$0.73/m³ de la planta de desalinización en marcha para la ciudad. La restauración de amunas y humedales son las intervenciones más costo-efectivas entre las intervenciones verdes o grises consideradas, y las intervenciones de gestión de pastos podrían ser más competitivas en el costo si los valores reales estuvieran más cerca de los valores supuestos de ‘mejor estimación’ o ‘favorables’ en lugar de los valores conservadores.

Tabla 6. Costo del beneficio de volumen en la estación seca (USD/m³) para cuatro intervenciones verdes

	Costo por unidad de volumen de agua en la estación seca (USD/m ³)
Restauración de amunas	\$0.004
Restauración hidrológica de los humedales	\$0.031
Exclusión del ganado de los pajonales de puna	\$0.163
Pastoreo rotativo en los pajonales de puna	\$0.316

¹¹ Para comparar el impacto de las intervenciones verde con la infraestructura gris, la métrica de los beneficios hidrológicos cambia en esta sección de m³/s (caudal base) a m³ (volumen anual del caudal en la estación seca). Los cálculos en el Anexo 2 explican esta conversión.

COSTO NIVELADO POR METRO CÚBICO SEGÚN FUENTE DE AGUA

Orden	Fuente de Agua	US\$/m ³
1	Regulación Jacaybamba en el Río Chillón	0.1048
2	Punrun I Etapa-Río Chillón	0.1216
3	MARCA V: Presa Casacancha	0.1515
4	Intercambio Der. Agua-I Tramo Chosica-La Atarjea	0.1743
5	San Antonio Escondido	0.1774
6	MARCA IV: Huascacocha con derivación hacia el Rímac	0.1821
7	Intercambio Dre. Agua-II Tramo Chosica-La Atarjea	0.1849
8	MARCA II: Derivación Pomacocha-Río Blanco-1ra y 2da Etapa	0.2280
9	Las Tinajas y PTAP	0.2307
10	Ampliación Tunel Grathon 4 Km.	0.2493
11	Planta Desaladora de Agua de Mar, Lima Sur.	0.7365

Figura 3. Costo estimado (USD/m³) de 11 proyectos de infraestructura gris para aumentar el suministro de agua de Lima. Fuente: Nippon Koei LAC Co., Ltd. (2011)

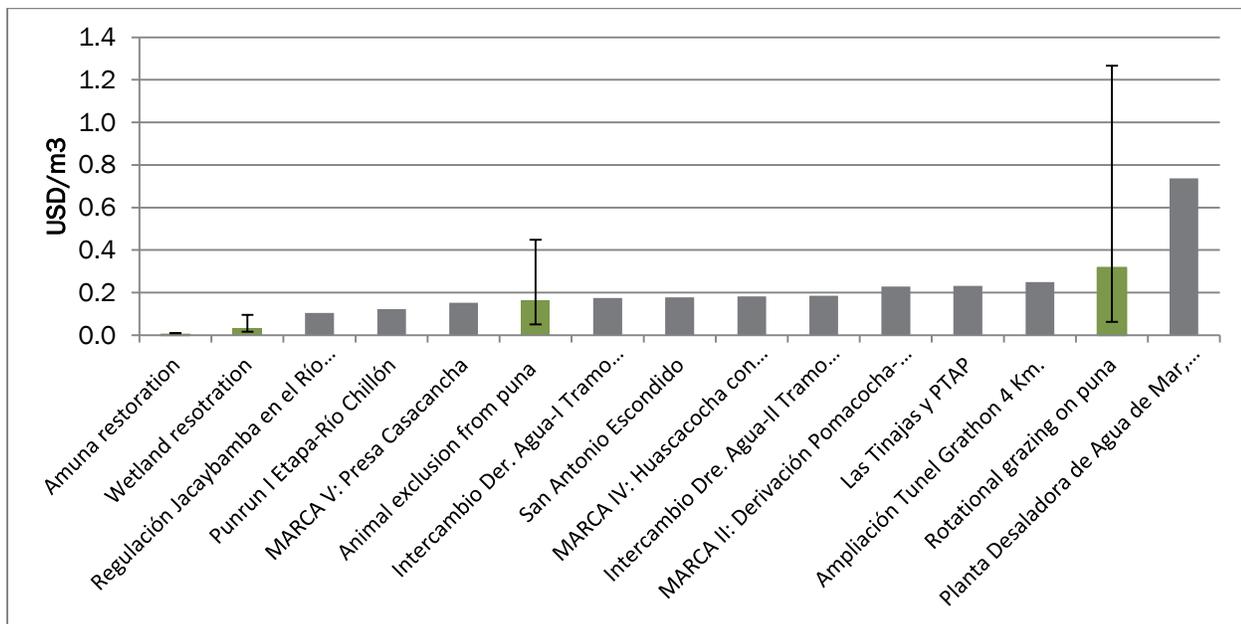


Figura 4. Costos (USD/m³) de intervenciones verdes y grises para el suministro de agua de Lima. Fuentes: Análisis actual y Nippon Koei (2011).

Áreas prioritarias de investigación para intervenciones basadas en cuencas

Como se expresó anteriormente, la comprensión de los procesos y velocidades del caudal, una vez que el agua es infiltrada, es fundamental para calcular los beneficios en términos de incorporar los retardos de tiempo en el sistema hidrológico. Un número de técnicas están disponibles, desde sencillas evaluaciones de conductividad eléctrica del agua, hasta análisis más complejos de composición isotópica de los átomos de hidrógeno y de oxígeno de la molécula

de agua. Los experimentos de rastreo serían muy útiles en muchas circunstancias. Estos podrían ser especialmente útiles para confirmar la hipótesis de la prometedora intervención de restauración de humedales de que la infiltración mejorada está realmente tendiendo un puente hasta la estación seca. Este tipo de investigación no se ha hecho antes en estos ambientes.

Las intervenciones que implican cambios en los regímenes de pastoreo y re-humectación de los humedales, se beneficiarían en gran medida de estudios experimentales en micro-cuencas que incluyan mediciones del caudal continuo en los arroyos cercanos.

Los estudios hidrológicos necesitan muchos años de monitoreo para capturar la variabilidad intrínseca de las condiciones hidrológicas a lo largo de varios años. Sin embargo, los diseños de investigación y monitoreo pueden dirigirse específicamente a la producción de resultados a corto plazo (= pocos años).

Otras aplicaciones para las metodologías de cálculo

Las metodologías de cálculo utilizadas para estimar el rendimiento hidrológico de cada intervención verde se pueden aplicar a una variedad de otras situaciones.

Por ejemplo, Aquafondo podría decidir priorizar los proyectos individuales para una inversión en base a la efectividad del costo a nivel de sitio esperada para cada proyecto, utilizando metodologías relativamente sencillas que diversos socios desarrollando proyectos podrían aprender a aplicar. Las agencias gubernamentales podrían utilizar las metodologías para estimar el beneficio hidrológico de programas de asistencia técnica rural, muchos de los cuales han implementado proyectos similares a los evaluados en este estudio, como parte del análisis de costo-beneficio requerido para la aprobación presupuestaria. El sector privado también podría utilizar estas metodologías para cuantificar el impacto esperado de las intervenciones de gestión de los recursos hídricos. Una serie de estándares y certificaciones emergentes, tales como el Certificado de Beneficios de Agua de Gold Standard y el estándar de la Alliance for Water Stewardship, ofrecen oportunidades para que el sector privado valore, o sea reconocido, por la mejoras cuantificadas de los recursos hídricos.

Referencias

- Buytaert, W. and B. De Bièvre (2012) Water for cities: the impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes, *Water Resources Research*, 48, W08503, doi:10.1029/2011 WR011755.
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bievre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., and R. Hofstede (2006) Human Impact on the Hydrology of the Andean Paramos, *Earth Science Reviews* 79, 53-72.
- De Bievre, B., Acosta, L. and B. Ochoa (2012) Regional Initiative Monitoring Hydrological Andean Ecosystems Puna Moors Forests, INTERCLIMA 2012 Lima, 29-31 October 2012.
- De Bievre, B., Acosta, L., and M. Janampa (2013) CONDESAN Technical Report N2, Methodology and Application of SWAT Model and Conceptual Hydrological Model in the Basins of the Chillón, Rimac, and Lurín.
- Kieser, M. (2012) Identification of Common Project Goals and Metrics for Aquafondo (Water Fund for Lima & Callao). Phase 1 Technical Report. Kieser & Associates, LLC.
- Nippon Koei LAC Co., Ltd. (2011). Proyecto "Manejo Integrado de los Recursos Hídricos para el Abastecimiento de Agua a Lima Metropolitana." Informe Final.
- Zimmerman et al (2010) No Differences in Soil Carbon Stocks Across the Tree Line in the Peruvian Andes, *Ecosystems* 13 62-74.

Anexo 1: Documentos técnicos sobre cuantificación de beneficios de las intervenciones basadas en cuencas

Estos tres documentos técnicos describen las metodologías de cálculo utilizadas para estimar el rendimiento hidrológico de cuatro intervenciones verdes en cuanto al caudal base en este estudio.

- Fang, A., Klang, J., and Kieser, M (2014). Restoration of Puna Grasslands: Quantifying Potential Baseflow Improvements.
- Kieser, M. and Boyer, K. B. (2014). Restoration of Wetlands: Quantifying Potential Baseflow Improvements.
- Kieser, M. and Fang, A. (2014). Restoration of Amunas: Quantifying Potential Baseflow Improvements

Anexo 2: Cálculos del costo y rendimiento de las intervenciones verdes (Hoja de cálculo Excel)