

ADENDA N°6 AL CONVENIO DE COOPERACION TECNICA ENTRE EL SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERU (SENAMHI) Y EL INSTITUTO DE INVESTIGACION PARA EL DESARROLLO (IRD)

Conste por el presente documento la Adenda N° 6 al Convenio de Cooperación Técnica, que celebran de una parte,

El **SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERÚ**, en adelante denominado “**SENAMHI**”, con domicilio legal en Jirón Cahuide n°785, Jesús María, Departamento y Provincia de Lima, Perú, representado por su Presidenta Ejecutiva (e), **Blga. Raquel Hilianova SOTO TORRES**.

Y,

El **INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO**, en adelante denominado “**IRD**”, organismo público de carácter científico y tecnológico de la República de Francia, con sede en “Le Sextant” - 44 Boulevard de Dunkerque - CS 90009 - 13572 Marsella Cedex 2, Francia, representado por su Presidenta Directora General, **Dra. Valérie VERDIER**.

En adelante llamadas **LAS PARTES**;

VISTO El Convenio de Cooperación Técnica entre el SENAMHI y el IRD firmado el 12 de abril 2005, la Adenda n°1 firmada el 25 de marzo de 2009, la Adenda n°2 firmada el 16 de julio de 2010, la Adenda n°3 firmada el 21 de junio de 2013, la Adenda n°4 firmada el 13 de abril de 2017, la Adenda n°5 firmada el 30 de julio con eficacia anticipada al 13 de abril de 2021.

CONSIDERANDO El mutual interés del IRD y del SENAMHI para la realización de las investigaciones sobre climatología, hidrología, geoquímica y flujo sedimentarios en la cuenca amazónica y en los Andes del Perú.

SE ACUERDA LO SIGUIENTE:

ARTICULO 1: OBJETO

La presente Adenda tiene por objeto:

- 1) Actualizar los proyectos y los responsables científicos que se encuentran descritos en los Anexos Científicos N° 1 y N° 2.
- 2) Prolongar la duración del Convenio.

ARTICULO 2: DURACIÓN

La validez del Convenio de Cooperación Técnica entre el SENAMHI-IRD se prolonga por cuatro (4) años.



ARTÍCULO 3: SOBRE LA VIGENCIA

LAS PARTES acuerdan que la prolongación de la validez del Convenio de Cooperación Técnica entre el SENAMHI-IRD se efectúa a partir del 13 de abril de 2025, considerando que se vienen ejecutando actividades en el marco del Convenio hasta la fecha de suscripción del presente documento.

ARTÍCULO 4: CORPUS CONTRACTUAL

El documento contractual entre el SENAMHI y el IRD se compone del Convenio de Cooperación Técnica, de las Adendas n°1, n°2, n°3, n°4, n°5 y de la presente Adenda y sus Anexos Científicos n°1 y n°2.

Hecho en Lima, en cuatro (04) ejemplares originales, dos (02) en francés y dos (02) en español siendo igualmente fidedigna cada una de las versiones, el día 25. de agosto de 2025.

Por el IRD


.....
Valérie VERDIER
Presidenta Directora General



Por el SENAMHI


.....
Raquel Julianova SOTO TORRES
Presidenta Ejecutiva (e)



ANEXO CIENTÍFICO N°1

CAMBIOS HIDROCLIMATOLÓGICOS EN LA REGIÓN ANDINO AMAZÓNICA PERUANA Y EN EL ALTIPLANO PERUANO EN UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO Y DE USO DE SUELO

Responsables científicos:

Por el IRD: Clémentine Junquas

Por el SENAMHI: Waldo Lavado Casimiro

1. PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS GENERALES

La cuenca del río Amazonas alberga el bosque tropical más grande del mundo, el cual desempeña un papel fundamental en regular el clima a escala global y regional (Nobre et al., 2016; Sierra et al., 2021). De esta manera, el bosque Amazónico modula la circulación atmosférica en diferentes escalas espaciales y proporciona humedad hacia regiones vecinas como los Andes tropicales (Ampuero et al., 2020; Espinoza et al., 2020; Segura et al., 2020; Staal et al., 2018; Segura et al., 2023; Wongchuig et al., 2023). A su vez, los Andes tropicales son la principal fuente de nutrientes, sedimentos y flujos hídricos hacia la parte baja de la cuenca amazónica (e.g. Espinoza et al., 2009a; Guyot et al., 2007). Por otro lado, los Andes tropicales del sur es una región importante para la agricultura y el turismo, particularmente durante la temporada de lluvias, cuando las condiciones meteorológicas y climáticas tienen una fuerte influencia en las actividades socioeconómicas. Esta región incluye la región del Altiplano, una cuenca intermontana a una altitud de 3800 m en la Cordillera de los Andes, rodeada en sus lados oriental y occidental por cadenas montañosas y glaciares (e.g., Garreaud 1999; Garreaud et al., 2003). Es particularmente vulnerable a eventos hidrológicos y climatológicos extremos, incluidos inundaciones y deslizamientos de tierra (e.g., Lavado et al., 2010), así como a los riesgos relacionados con los recursos hídricos asociados con la reciente aceleración del retroceso de los glaciares andinos (Vuille et al., 2008; Rabatel et al., 2013). También es el lugar del lago navegable y de agua dulce más grande del mundo por encima de los 3000 m s.n.m., el lago Titicaca. Por lo tanto, los Andes y la Amazonía interactúan en un frágil equilibrio que se encuentra bajo amenaza por cambios globales que incluye al cambio climático y cambios en el uso del suelo (Sierra et al., 2021).

En la actualidad, existe un gran debate en la comunidad científica sobre los cambios ambientales críticos que podrían conducir al punto de no retorno, más conocido en la literatura como “tipping point”, de la selva Amazónica, esto significa una pérdida irreversible de su biodiversidad y del ciclo hidrológico (Davidson et al., 2012; Nobre et al., 2016; Wongchuig et al., 2023). A pesar de algunas estimaciones basadas en modelos que asocian valores de puntos de no retorno de la selva Amazónica a un incremento de la temperatura global de 3 a 4 °C o a tasas de deforestación que superan el 40% (Lenton et al., 2008; Nobre et al., 2016; Salazar and Nobre, 2010),

recientes estudios muestran que este punto de no retorno está influenciado por la combinación de varios factores en conjunto como la deforestación, el uso generalizado del fuego y la variabilidad del clima (Aragão et al., 2018; Brando et al., 2020; Lovejoy and Nobre, 2018). Sin embargo, sigue habiendo incertidumbres debido a procesos biofísicos aún desconocidos y a escenarios hipotéticos de deforestación (Lawrence and Vandecar, 2015; Sampaio et al., 2007). Estudios recientes muestran la posible existencia de un acoplamiento entre la pérdida de bosques en la Amazonia y los cambios en los componentes del régimen hidrológico y climático, como la evapotranspiración o la cantidad de lluvia (Lawrence and Vandecar, 2015; Sampaio et al., 2007; Spracklen et al., 2012; Wongchuig et al., 2023), la duración de la estación seca (Aragão et al., 2018; Arias et al., 2015; Fu et al., 2013; Khanna et al., 2017; Marengo et al., 2011; Ruiz-Vásquez et al., 2020; S. Debortoli et al., 2015; Wright et al., 2017; Sierra et al., 2023), entre otros. Esta problemática es particularmente relevante en la Amazonía de los países Andinos, considerada como una de las zonas con mayor biodiversidad del planeta (Zenit, 2019) y la región más lluviosa de toda la cuenca amazónica (Espinoza et al., 2009b, 2015). Por otro lado, la amazonía peruana ha reportado en los últimos años una intensificación de eventos hidroclimáticos extremos, los cuales han impactado directamente el estado vegetativo del bosque (Espinoza et al., 2016; Lavado Casimiro et al., 2013; Marengo and Espinoza, 2016; Wongchuig-Correa et al., 2020; Espinoza et al., 2022; 2024). Además, diversas actividades humanas como tala ilegal de bosques, minería ilegal, etc, ponen en alto riesgo el futuro del frágil equilibrio climático entre la Amazonía y los Andes. En efecto, mediante el uso de modelos acoplados entre la superficie y la atmósfera, recientes estudios han mostrado que la precipitación en los Andes peruanos podría disminuir significativamente como consecuencia de la deforestación en la Amazonía (e.g. Lejeune et al., 2015; Ruiz-Vásquez et al., 2020; Sierra et al., 2023; Saavedra et al., 2021), lo cual pondría en alto riesgo la seguridad hídrica, energética y alimentaria del país. En el Altiplano, un retraso del inicio de las lluvias ha sido recientemente reportado, en relación a modificaciones en los patrones de circulación atmosféricos dominantes (Milla et al., 2025; De la Cruz et al., 2025), y el año 2022-23 fue caracterizado por condiciones secas remarcables (Gutierrez et al., 2024). En el marco del cambio climático, estas condiciones secas podrían intensificarse hacia fines del siglo 21 (Agudelo et al., 2023).

La simulación de la variabilidad espacial de la precipitación a alta resolución en la región de transición Andes-Amazonía y en los Andes tropicales del sur representa una tarea desafiante para los modelos atmosféricos regionales a escala kilométrica (e.g., Martínez et al., 2024; Junquas et al., 2024). La modelización de los procesos climáticos en el Altiplano andino enfrenta desafíos significativos, especialmente en la representación de los gradientes de humedad entre las regiones húmedas de la Amazonía y la costa semiárida del Pacífico, lo que dificulta la generación de simulaciones precisas. Mejorar la precisión de estos modelos es crucial para comprender y predecir los patrones de precipitación en la región, lo que subraya la necesidad de entender mejor la dinámica de estas interacciones. Abordar esta complejidad es esencial para avanzar en las capacidades de investigación sobre los procesos físicos (e.g., Junquas et al., 2018) y proporcionar pronósticos confiables.



Bajo estas problemáticas de primer orden, investigadores del SENAMHI y del IRD interactúan desde hace más de 20 años para mejorar nuestro entendimiento del sistema Andes-Amazonía y predecir los posibles impactos de los cambios ambientales sobre los recursos hídricos. En el presente programa de investigación, nuestras actividades estarán orientadas a estudiar la conectividad, en términos hidrológicos y climáticos del bosque amazónico (dentro y fuera del Perú) y los recursos hídricos de las cuencas Andinas, particularmente dependientes de las precipitaciones estacionales. Nuestro objetivo final será reducir las incertidumbres respecto a los posibles impactos de la deforestación amazónica en los recursos hídricos en el Perú.

Los investigadores que lideran esta iniciativa tienen una amplia trayectoria de colaboración de más de 20 años, en los cuales han co-publicado más de 30 artículos científicos en revistas internacionales de alto impacto sobre esta temática. Además, los investigadores hacen parte de estructuras co-construidas entre el IRD y SENAMHI como la red ANDES-C2H, el SNO-HYBAM, etc., lo cual garantiza el adecuado desarrollo y continuidad de este proyecto. Finalmente, estos investigadores hacen parte de proyectos y programas internacionales directamente relacionados con el tema planteado en este programa, como el Grupo de Trabajo Regional sobre la Hidrogeomorfología de la Cuenca Andino-Amazónica del PHI-LAC de la UNESCO; el programa hidroclimático regional de los Andes (ANDEX) bajo el patrocinio de GEWEX, el Panel Científico para la Amazonía (SPA) bajo el auspicio de "Sustainable Development Solutions Network (SDSN)" de las Naciones Unidas, y del proyecto CECC (Cambio climático y ciclo del agua, IRD/AFD), lo cual dará visibilidad y relevancia internacional a los trabajos desarrollados en el presente programa.



2 — OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El presente programa cuenta con los siguientes objetivos específicos:

- Analizar los cambios en el régimen hidrológico y climático asociados al cambio climático y a cambios en la cobertura vegetal en la cuenca amazónica peruana.
- Realizar la evaluación de variables del ciclo hidrológico y condiciones vegetativas generados por datos de sensoramiento remoto para la modelación hidrológica y climática en las cuencas Andino-Amazónicas. Elaborar modelos estadísticos para la identificación de patrones de precipitación basados en patrones de circulación atmosférica dominantes.
- Realizar el modelado atmosférico de alta resolución en cuencas características de la región de transición Andes-Amazonía y del Altiplano peruano.
- Evaluar impactos de escenarios futuros de deforestación y cambio climático en la Amazonía sobre la disponibilidad hídrica en la región andina.



- Formular proyectos de investigación para la obtención de recursos (nacionales e internacionales) destinados al desarrollo de las actividades del proyecto y la formación de investigadores.

3 - METODOLOGÍAS

3.1. Analizar los cambios en el régimen hidrológico y climático asociados a cambios en la cobertura vegetal en la cuenca amazónica peruana

Los cambios en el régimen hidrológico y climático se analizarán a través del análisis de cambios en el balance superficial de agua y balance energético, tomando como base el marco Budyko y su relación con los cambios en la cobertura vegetal (Wongchuig-Correa et al., 2021). Este análisis proporciona una relación entre el índice de evaporación (IE) (evapotranspiración real vs. precipitación), el índice de sequedad (IS) (evapotranspiración potencial vs. precipitación) (Budyko, 1974) y el cambio de ambos índices en el tiempo en función a los cambios en la cobertura vegetal. De esta forma se obtiene información sobre las regiones limitadas por la energía ($IS < 1$) y limitadas por el agua ($IS > 1$) y, por lo tanto, una aproximación a una posible transición de un estado de selva tropical a savana.

Dada la actual disponibilidad de información hidro climática y de cobertura vegetal a nivel global gracias a numerosas bases de datos basadas en sensores remotos, el análisis en la Amazonía peruana será llevado a cabo de una manera distribuida tanto espacial como temporal de las principales variables hidroclimáticas (validadas según la metodología 3.2) en relación con los cambios de la cobertura vegetal.

3.2. Validación de variables del ciclo hidrológico y condiciones vegetativas generados por datos de sensoramiento remoto y modelado hidrológico

Algunos estudios previos han evaluado la consistencia de variables del ciclo hidrológico (típicamente precipitaciones, evapotranspiración, agua en el suelo, etc.) en los Andes y la Amazonía peruana (Chavez and Takahashi, 2017; Condom et al., 2020, 2011; Espinoza et al., 2019; Mourre et al., 2016; Paccini et al., 2018; Satgé et al., 2019). En la presente investigación será evaluado inicialmente a escala regional dentro de cuencas piloto (e.g. Vilcanota, Apurímac, etc) que presenta características propias de la región de transición Andes-Amazonía. Esta evaluación se realizará fraccionando la escala temporal en periodos: 2001-2005, 2005-2009, 2009-2013 y 2013-2017 para datos diarios como las precipitaciones. Los datos serán evaluados de acuerdo con diferentes criterios estadísticos, como coeficiente de correlación (CC), desviación estándar (SD), porcentaje de bias (%B) y error medio cuadrado centrado (CRMSE). Finalmente, gracias al uso de observaciones de caudales, propondremos un análisis de balance hídrico superficial ($DS = P - R - Et$) que nos permitirá evaluar el error relativo de las diferentes bases de datos componentes del ciclo hidrológico. Estos análisis, aunque simples, resultan de fundamental relevancia para el entendimiento de nuestra capacidad observacional del ciclo hidrológico, particularmente importante en la Amazonía Andina (e.g. Builes-Jaramillo and Poveda, 2018).



Con la selección de las más adecuadas bases de datos se realizará la representación espacio-temporal de la precipitación en la cuenca, usando las técnicas geoestadísticas de interpolación con las covariables y elevación. Esta información espacio-temporal será utilizado para el modelamiento hidrológico y evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca para el periodo de 1981-presente, identificar las variaciones de la disponibilidad hídrica a consecuencia de la variación de la vegetación (degradación debido a deforestación, cambio de uso, entre otros) a lo largo del periodo de análisis.

En el caso del SENAMHI, se está trabajando con el modelo hidrológico SWAT (“Soil and Water Assessment Tool”); se tiene bastante experiencia con este modelo hidrológico y se puede utilizar para evaluar los impactos de la deforestación sobre los recursos hídricos.

3.3 Para la elaboración de modelos estadísticos para la identificación de patrones de precipitación basados en patrones de circulación atmosférica dominantes, se seguirá la técnica de downscaling estadístico, buscando relaciones entre patrones de circulación atmosféricos de escala regional con lluvias intensas (e.g. Milla et al., 2025; Agudelo et al., 2023). Estos análisis se realizan usando datos de Reanálisis, modelos atmosféricos y variables observacionales del SENAMHI.

3.4 Para el modelado atmosférico de alta resolución en cuencas características de la región de transición Andes-Amazonía y del Altiplano peruano

El estudio de los impactos hidroclimáticos de cambio climático y de uso de suelo se realizará mediante el uso de un modelo de alta resolución en la región de transición Andes-Amazonía y en el Altiplano. Se usará el modelo WRF (Weather Research and Forecasting) el cual ha sido validado en la región Cusco en Junquas et al. (2018) y en la región de Puno en Llacza et al. (submitted). Los resultados de simulación serán analizados a diferentes escalas espaciales (hasta una resolución espacial kilométrica). WRF es el único modelo de alta resolución previamente validado en la región amazónica bajo escenarios de cambios de superficie (Bagley et al., 2014) y en regiones de compleja topografía (Junquas et al., 2018; Saavedra et al., 2020). La validación de las salidas de WRF en nuestra región de estudio se realizará con las bases de datos validadas como resultados obtenidos en la sección 3.2.

Asimismo, se procederá a un estudio de los procesos locales y regionales en los modelos regionales y su evolución futura (con las incertidumbres asociadas) para identificar las posibles trayectorias hidroclimáticas en las regiones de interés. En particular, se pondrá énfasis en diferenciar los procesos diurnos y nocturnos, en promedios climatológicos, durante los períodos simulados recientes y futuros. Se considerarán los resultados de las simulaciones de downscaling regional del SENAMHI, en coordinación con el equipo de la Subdirección de Modelización Numérica (SMN).

3.4. Para la formulación de proyectos de investigación

Nuestro equipo de investigación tiene como prioridad la obtención de fondos externos para el funcionamiento de nuestro programa de investigación. En particular, se prevé



aplicar a fondos nacionales (e.g. Fondecyt) en internacionales (principalmente de la cooperación francesa, aunque no exclusivamente). Actualmente, este equipo de investigación ya cuenta con proyectos ganados (ECOS-Nord y ClimatAmSud), que permitirán iniciar los objetivos del presente programa. Finalmente, nuestra participación en diferentes programas y estructuras internacionales (mencionadas en la introducción) nos permitirán tener una visión amplia de las posibilidades de financiamiento para la investigación.

Adicionalmente, para el adecuado desarrollo de este proyecto se prevé:

- Reunión de los equipos de trabajo al menos una vez por año de manera presencial.
- Reuniones de los equipos de trabajo al menos con frecuencia semestral de manera virtual o presencial.
- Formación de estudiantes (tesis de ingeniería o licenciatura, maestría y doctorado, según las posibilidades de financiamiento y candidatos).
- Participación en congresos científicos internacionales y nacionales.
- Publicación de los resultados en revistas científicas internacionales indexadas.

4 - COMPROMISOS SENAMHI/IRD

El SENAMHI se compromete a proporcionar:

- Sueldo de su personal (SENAMHI)
- Viáticos de su personal (SENAMHI) para las actividades de campo
- Oficinas y laboratorio

El IRD se compromete a proporcionar:

- Sueldo de su personal (IRD)
- Viáticos de su personal (IRD) para las actividades de campo
- Presupuesto anual de funcionamiento (misiones, equipamientos, conferencias, etc.)

5 - PARTICIPANTES

Equipo científico del IRD:

Clémentine Junquas (IGE/IRD), Jhan Carlo Espinoza (IRD/IGE), Thomas Condom (IGE/IRD), Sly Wongchuig Correa (IGE/IRD), Jean Emmanuel Sicart (IGE/IRD), Thierry Lebel (IRD/IGE), Myriam Khodri (LOCEAN/IRD), Vincent Moron (CEREGE/Univ Aix Marseille).

Equipo científico del SENAMHI:



Waldo Sven Lavado Casimiro (DHI), Cristian Montesinos Caceres (DHI), Danny Saavedra (DHI), Wilson Suarez (DHI), Harold Llauca (DHI), Karim Quevedo (DAM), Alan Gerardo Llacza Rodriguez (SMN), Gerardo Cristian Jacome Vergaray (DMA - SMN), Jorge Llamocca Huamaní (SMN), Jorge Armando Ordoñez Piscocoya (SMN).

Referencias

- Agudelo, J., Espinoza, J.C., Junquas, C., Arias, P. A., Sierra, J. P., Olmo, M. E. 2023. Future projections of low-level atmospheric circulation patterns over South Tropical South America: Impacts on precipitation and Amazon dry season length. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. <https://doi.org/10.1029/2023JD038658>
- Ampuero, A., Strikis, N.M., Apaéstegui, J., Vuille, M., Novello, V.F., Espinoza, J.C., Cruz, F.W., Vonhof, H., Mayta, V.C., Martins, V.T.S., Cordeiro, R.C., Azevedo, V., Sifeddine, A., 2020. The Forest Effects on the Isotopic Composition of Rainfall in the Northwestern Amazon Basin, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. <https://doi.org/10.1029/2019JD031445>
- Aragão, L.E.O.C., Anderson, L.O., Fonseca, M.G., Rosan, T.M., Vedovato, L.B., Wagner, F.H., Silva, C.V.J., Silva Junior, C.H.L., Arai, E., Aguiar, A.P., Barlow, J., Berenguer, E., Deeter, M.N., Domingues, L.G., Gatti, L., Gloor, M., Malhi, Y., Marengo, J.A., Miller, J.B., Phillips, O.L., Saatchi, S., 2018. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nat. Commun.* 9, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>
- Arias, P.A., Fu, R., Vera, C., Rojas, M., 2015. A correlated shortening of the North and South American monsoon seasons in the past few decades. *Clim. Dyn.* 45, 3183–3203. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2533-1>
- Bagley, J.E., Desai, A.R., Harding, K.J., Snyder, P.K., Foley, J.A., 2014. Drought and deforestation: Has land cover change influenced recent precipitation extremes in the Amazon? *J. Clim.* 27, 345–361. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00369.1>
- Brando, P.M., Soares-Filho, B., Rodrigues, L., Assunção, A., Morton, D., Tuchsneider, D., Fernandes, E.C.M., Macedo, M.N., Oliveira, U., Coe, M.T., 2020. The gathering firestorm in southern Amazonia. *Sci. Adv.* 6, 1–10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay1632>
- Budyko, M.I., 1974. Edited by, in: Budyko, M.I.B.T.-I.G. (Ed.), *Climate and Life*. Academic Press, p. iii. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(09\)60001-2](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(09)60001-2)
- Builes-Jaramillo, A., Poveda, G., 2018. Conjoint Analysis of Surface and Atmospheric Water Balances in the Andes-Amazon System. *Water Resour. Res.* 54, 3472–3489. <https://doi.org/10.1029/2017WR021338>
- Chavez, S.P., Takahashi, K., 2017. Orographic rainfall hot spots in the Andes-Amazon transition according to the TRMM precipitation radar and in situ data. *J. Geophys. Res. Atmos.* 122, 5870–5882. <https://doi.org/10.1002/2016JD026282>
- Condom, T., Martínez, R., Pabón, J.D., Costa, F., Pineda, L., Nieto, J.J., López, F., Villacis, M., 2020. Climatological and Hydrological Observations for the South American Andes: In situ Stations, Satellite, and Reanalysis Data Sets. *Front. Earth Sci.* 8, 1–20. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00092>



- Condom, T., Rau, P., Espinoza, J.C., 2011. Correction of TRMM 3B43 monthly precipitation data over the mountainous areas of Peru during the period 1998–2007. *Hydrol. Process.* 25, 1924–1933. <https://doi.org/10.1002/hyp.7949>
- Davidson, E.A., De Araujo, A.C., Artaxo, P., Balch, J.K., Brown, I.F., Mercedes, M.M., Coe, M.T., Defries, R.S., Keller, M., Longo, M., Munger, J.W., Schroeder, W., Soares-Filho, B.S., Souza, C.M., Wofsy, S.C., 2012. The Amazon basin in transition. *Nature* 481, 321–328. <https://doi.org/10.1038/nature10717>
- Debortoli, N.S., Dubreuil, V., Hirota, M., Filho, S.R., Lindoso, D.P., Nabucet, J., 2017. Detecting deforestation impacts in Southern Amazonia rainfall using rain gauges. *Int. J. Climatol.* 37, 2889–2900. <https://doi.org/10.1002/joc.4886>
- De la Cruz G., Huerta A., Espinoza J.C., Lavado-Casimiro W. 2024. Present Variability and Future Change in Onset and Cessation of the Rainy Season Over Peru. *International Journal of Climatology.* <https://doi.org/10.1002/joc.8700>
- Espinoza, J.C., Chavez, S., Ronchail, J., Junquas, C., Takahashi, K., Lavado, W., 2015. Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: Spatial distribution, rainfall intensity, and relations with large-scale atmospheric circulation. *Water Resour. Res.* 51, 3459–3475. <https://doi.org/10.1002/2014WR016273>
- Espinoza, J.C., Garreaud, R., Poveda, G., Arias, P.A., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M., Scaff, L., 2020. Hydroclimate of the Andes Part I: Main Climatic Features. *Front. Earth Sci.* 8, 1–20. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00064>
- Espinoza, J.C., Guyot, J.L., Ronchail, J., Cochonneau, G., Filizola, N., Fraizy, P., Labat, D., de Oliveira, E., Ordoñez, J.J., Vauchel, P., 2009a. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974–2004). *J. Hydrol.* 375, 297–311. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.004>
- Espinoza, J.C., Ronchail, J., Guyot, J.L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., De Oliveira, E., Pombosa, R., Vauchel, P., 2009b. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *Int. J. Climatol.* 29, 1574–1594. <https://doi.org/10.1002/joc.1791>
- Espinoza, J.C., Ronchail, J., Marengo, J.A., Segura, H., 2019. Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Clim. Dyn.* 52, 5413–5430. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>
- Espinoza, J.C., Segura, H., Ronchail, J., Drapeau, G., Gutierrez-Cori, O., 2016. Evolution of wet-day and dry-day frequency in the western Amazon basin: Relationship with atmospheric circulation and impacts on vegetation. *Water Resour. Res.* 52, 8546–8560. <https://doi.org/10.1002/2016WR019305>
- Espinoza J.C., Marengo J.A., Schongart J., Jimenez J.C. 2022. The new historical flood of 2021 in the Amazon River compared to major floods of the 21st century: Atmospheric features in the context of the intensification of floods. *Weather and Climate Extremes.* <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100406>.
- Espinoza J.C., Jimenez J.C., Marengo J.A. Schongart J., Ronchail J., Lavado-Casimiro W. Ribeiro J.M. 2024. The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Sci Rep* 14, 8107. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>.
- Fu, R., Yin, L., Li, W., Arias, P.A., Dickinson, R.E., Huang, L., Chakraborty, S., Fernandes, K., Liebmann, B., Fisher, R., Myneni, R.B., 2013. Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate



projection. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 110, 18110–18115. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302584110>

Guyot, J.L., Jouanneau, J.M., Soares, L., Boaventura, G.R., Maillet, N., Lagane, C., 2007. Clay mineral composition of river sediments in the Amazon Basin. *Catena* 71, 340–356. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.02.002>

Junquas, C., Takahashi, K., Condom, T., Espinoza, J.C., Chavez, S., Sicart, J.E., Lebel, T., 2018. Understanding the influence of orography on the precipitation diurnal cycle and the associated atmospheric processes in the central Andes. *Clim. Dyn.* 50, 3995–4017. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3858-8>

Junquas, C., Martinez, J. A., Bozkurt, D., Viale, M., Fita, L., Trachte, K., ... & Espinoza, J. C. (2024). Recent progress in atmospheric modeling over the Andes—part II: projected changes and modeling challenges. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1427837.

Khanna, J., Medvigy, D., Fueglistaler, S., Walko, R., 2017. Regional dry-season climate changes due to three decades of Amazonian deforestation. *Nat. Clim. Chang.* 7, 200–204. <https://doi.org/10.1038/nclimate3226>

Lavado Casimiro, W.S., Labat, D., Ronchail, J., Espinoza, J.C., Guyot, J.L., 2013. Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon-Andes basin over the last 40 years (1965-2007). *Hydrol. Process.* <https://doi.org/10.1002/hyp.9418>

Lawrence, D., Vandecar, K., 2015. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nat. Clim. Chang.* 5, 27–36. <https://doi.org/10.1038/nclimate2430>

Leite-Filho, A.T., de Sousa Pontes, V.Y., Costa, M.H., 2019. Effects of Deforestation on the Onset of the Rainy Season and the Duration of Dry Spells in Southern Amazonia. *J. Geophys. Res. Atmos.* 124, 5268–5281. <https://doi.org/10.1029/2018JD029537>

Lejeune, Q., Davin, E.L., Guillod, B.P., Seneviratne, S.I., 2015. Influence of Amazonian deforestation on the future evolution of regional surface fluxes, circulation, surface temperature and precipitation. *Clim. Dyn.* 44, 2769–2786. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2203-8>

Lenton, T.M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.W., Lucht, W., Rahmstorf, S., Schellnhuber, H.J., 2008. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105, 1786–1793. <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>

Lovejoy, T.E., Nobre, C., 2018. Amazon tipping point. *Sci. Adv.* 4, 1–2. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2340>

Marengo, J.A., Espinoza, J.C., 2016. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *Int. J. Climatol.* 36, 1033–1050. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>

Marengo, J.A., Tomasella, J., Alves, L.M., Soares, W.R., Rodriguez, D.A., 2011. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophys. Res. Lett.* 38, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2011GL047436>

Martinez, J. A., Junquas, C., Bozkurt, D., Viale, M., Fita, L., Trachte, K., ... & Espinoza, J. C. (2024). Recent progress in atmospheric modeling over the Andes—part I: review of atmospheric processes. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1427783

Milla P., Espinoza J.C., Gutierrez R., Molina-Carpio J., Ronchail J., Espinoza-Romero D., Junquas C. 2025. Recent changes in the dry-to-wet transition season in the Andean Altiplano and related atmospheric circulation patterns (1981–2022). *Climate Dynamics.* <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07578-4>



- Mourre, L., Condom, T., Junquas, C., Lebel, T., E. Sicart, J., Figueroa, R., Cochachin, A., 2016. Spatio-temporal assessment of WRF, TRMM and in situ precipitation data in a tropical mountain environment (Cordillera Blanca, Peru). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 125–141. <https://doi.org/10.5194/hess-20-125-2016>
- Nobre, C.A., Sampaio, G., Borma, L.S., Castilla-Rubio, J.C., Silva, J.S., Cardoso, M., 2016. Land-use and climate change risks in the amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 113, 10759–10768. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>
- Paccini, L., Espinoza, J.C., Ronchail, J., Segura, H., 2018. Intra-seasonal rainfall variability in the Amazon basin related to large-scale circulation patterns: a focus on western Amazon-Andes transition region. *Int. J. Climatol.* 38, 2386–2399. <https://doi.org/10.1002/joc.5341>
- Ruiz-Vásquez, M., Arias, P.A., Martínez, A., Espinoza, J.C., 2020. Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Clim. Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4>
- S. Debortoli, N., Dubreuil, V., Funatsu, B., Delahaye, F., de Oliveira, C.H., Rodrigues-Filho, S., Saito, C.H., Fetter, R., 2015. Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971–2010). *Clim. Change* 132, 251–264. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1415-1>
- Saavedra, M., Junquas, C., Espinoza, J.C., Silva, Y., 2020. Impacts of topography and land use changes on the air surface temperature and precipitation over the central Peruvian Andes. *Atmos. Res.* 234, 104711. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104711>
- Salati, E., Vose, P.B., 1984. Amazon Basin: A system in equilibrium. *Science* (80-.). 225, 129–138. <https://doi.org/10.1126/science.225.4658.129>
- Salazar, L.F., Nobre, C.A., 2010. Climate change and thresholds of biome shifts in Amazonia. *Geophys. Res. Lett.* 37, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2010GL043538>
- Sampaio, G., Nobre, C., Costa, M.H., Satyamurty, P., Soares-Filho, B.S., Cardoso, M., 2007. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophys. Res. Lett.* 34, 1–7. <https://doi.org/10.1029/2007GL030612>
- Satgé, F., Ruelland, D., Bonnet, M.P., Molina, J., Pillco, R., 2019. Consistency of satellite-based precipitation products in space and over time compared with gauge observations and snow- hydrological modelling in the Lake Titicaca region. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 23, 595–619. <https://doi.org/10.5194/hess-23-595-2019>
- Segura, H., Espinoza, J.C., Junquas, C., Lebel, T., Vuille, M., Garreaud, R., 2020. Recent changes in the precipitation-driving processes over the southern tropical Andes/western Amazon. *Clim. Dyn.* 54, 2613–2631. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05132-6>
- Sierra, J.P., Espinoza, J.C., Junquas, C., Wongchuig S., Polcher J., Moron V., Fita L., Arias PA., Schrapffer A., Pennel R. 2023. Impacts of land-surface heterogeneities and Amazonian deforestation on the wet season onset in southern Amazon. *Clim Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06835-2>
- Sierra, J.P., Junquas, C., Espinoza, J.C., Segura, H., Condom, T., Andrade, M., Molina-Carpio, J., Ticona, L., Mardoñez, V., Blacutt, L., Polcher, J., Rabatel, A.,



y de modelización. Tal enfoque podrá permitir en el futuro densificar y complementar la red convencional HyBAm con estaciones virtuales.

El presente documento presenta líneas de acción para el grupo de trabajo IRD – SENAMHI con el fin de desarrollar capacidades institucionales, que permitan enfrentar los grandes desafíos relacionados a la cuenca Amazónica y en particular la cuenca del río Amazonas en el Perú.

Actividades específicas

Actividad 1 – Gestión de la red hidrométrica del SO HyBAm

Fortalecer las capacidades operacionales, asegurar la producción y la bancarización de los datos hidro-sedimentarios y geoquímicos

Equipo de investigación y responsables (*)

IRD	SENAMHI
Dr. Jean-Michel Martinez *	Dr. Waldo LAVADO *
Dr. William SANTINI	MSc. Nilton FUERTES
Dr. Jonathan PRUNIER	MSc. Jhonatan PEREZ
Ing. Christelle LAGANE	MSc. Renato COLLADO

Descripción

La misión fundamental del SO HyBAm es construir bases robustas de datos hidrológicas, a largo plazo (> 50 años). Así, durante el período de vigencia del presente acuerdo, la prioridad del SENAMI y el del IRD será la operación y el mantenimiento de la red de estaciones hidrológicas del SO HyBAm en la Amazonía Peruana para producir series de datos robustas y continuas.

Se tratará de asegurar la continuidad de las mediciones del nivel del agua, de los caudales y de la calidad del agua realizadas conjuntamente desde 2003 en el marco del SO HyBAm. Eventualmente, la red podrá adaptarse a los nuevos desafíos socio-ambientales de la región (ej. la cuenca del Madre de Dios), con la creación de nuevos puntos de medición *in situ*, sujetos a financiamiento. En 2025, las 8 estaciones HyBAm en el Perú son:

Estación	Posición	Río	Tipo estación
Lagarto	-10.607620°, -73.871190°	Ucayali	SNO
Requena	-5.041110°, -73.839940°	Ucayali	Referencia
Borja	-4.470230°, -77.548370°	Marañón	SNO
Chazuta	-6.570390°, -76.119250°	Huallaga	Referencia
San Regis	-4.513390°, -73.906770°	Marañón	Referencia
Tamshiyacu	-4.003430°, -73.161520°	Amazonas	Referencia
Bellavista	-3.482240°, -73.073370°	Napo	Referencia
Puerto Alegria	-4.115293°, -70.053422°	Amazonas	SNO



En las estaciones de “referencia” se monitorean los niveles de agua, los caudales líquidos y los flujos de sedimentos. Las estaciones tipo «SNO» son estaciones por las cuales el IRD tiene compromiso a largo plazo, y donde se mide los mismos parámetros que en las estaciones de “referencia”, más los elementos mayores, trazas, isótopos, materia orgánica y tierras raras

Las capacidades analíticas del SO HyBAm en el Perú serán aumentadas, con la creación de un nuevo laboratorio de filtración de materias en suspensión (MES) en la sede regional de Iquitos del SENAMHI. En este laboratorio se realizará los análisis MES de las 8 estaciones de la red HyBAm en el Perú. El IRD se compromete, dentro de los límites de sus posibilidades financieras, a comprar los materiales, requisito para la instalación de este laboratorio, y a participar en los gastos para los materiales consumibles (e.g. filtros) y podrá contribuir a financiar las obras para crear el laboratorio de acuerdo con los recursos financieros disponibles. El SENAMHI se compromete a proporcionar el local con el espacio adecuado, agua, electricidad, climatización, acceso internet, los técnicos para realizar los análisis y reportar los resultados en una base de datos, así que asegurar las cuestiones logísticas (transporte de muestras y de materiales).

Específicamente en la zona de Iquitos, el SENAMHI se compromete a asegurar el monitoreo de las 4 estaciones del SO HyBAm (Tamshiyacu, San Regis, Requena y Bellavista), con un apoyo puntual del IRD para financiar algunas operaciones, comprar materiales, capacitar los técnicos de la DZ de Loreto, bancarizar los datos y analizar su consistencia.

La planificación de esta actividad se definirá, de acuerdo con los recursos financieros y humanos disponibles y las limitaciones técnicas y científicas. Esta planificación estará sujeta a cambios, especialmente en el caso de eventos hidrológicos extremos.

Metodología

Las campañas de medición *in situ* se planificarán y organizarán en conjunto, varias veces al año, para asegurar el buen funcionamiento de la red y para recolectar los datos recopilados por los observadores del SO HyBAm asignados a estas estaciones. Una planificación será preparada en el inicio de cada año para definir cuantas campañas acontecerán, los locales y campanas de cada una bien como los participantes potenciales, incluidas otras instituciones participantes en el SO en Perú, tal y como se definen en el expediente de certificación del servicio de observación (2022-2026). La instrumentación limnimétrica de las estaciones se mantendrá y se nivelará en cada visita. Los observadores a cargo de las estaciones hidrométricas de la red HyBAm deberán anotar el nivel del agua 4 veces al día y mantener en buen estado las escalas limnimétricas en las estaciones. Tomarán también muestras de MES (Materias En Suspensión) en el río, siguiendo el plan de muestreo definido por los protocolos del SO HyBAm. En particular, para las estaciones SNO, el observador deberá realizar cada mes un muestreo destinado a la caracterización geoquímica del agua, seguido de una operación de filtración.

Estas campañas también servirán para reforzar la calibración, para cada estación, las curvas de gastos [nivel del agua] - [caudal] para el monitoreo de caudales, así como las relaciones [índice de concentración] - [concentración media en la sección] para el monitoreo de las MES. Las mediciones de caudales se realizarán utilizando correntómetros de efecto Doppler (aDcp). Las secciones de los ríos en las estaciones



de medición se muestrearán de acuerdo con protocolos específicos a los grandes ríos tropicales para determinar la concentración media en MES. De manera puntual, se podrán realizar muestreos adicionales para la caracterización de las propiedades de las MES (por ejemplo, mineralogía, granulometría). El diseño de las curvas de calibración, el tratamiento y el análisis de la consistencia de los datos hidrológicos recolectados, así como las series históricas del SENAMHI, se procesarán con los programas Hydracess, Hydromesad desarrollados en el marco del SO HyBAm y BARATIN desarrollado por el INRAE de Francia. Otros apps y códigos (R y Python conectados con bases SQL y SQLite) podrán ser gradualmente desarrollados e introducidos para complementar y reemplazar los programas mencionados.

Las muestras de MES se procesarán en el laboratorio SENAMHI – IRD de Iquitos, para garantizar el seguimiento periódico del SO. Otras partes interesadas del SO en Perú podrían tener que realizar análisis sobre campañas específicas. Se realizarán análisis geoquímicos para la determinación de los elementos mayores y trazas, isótopos, materia orgánica y tierras raras en Francia, en el laboratorio GET (Géosciences Environnement Toulouse). La transferencia de las muestras de geoquímicas (12 muestras anuales por estación) será realizada por la sede regional de Iquitos del SENAMHI hacia la representación del IRD en Lima con el apoyo financiero del IRD.

Resultados esperados

- Operar y mantener la red de medición hidrométrica del SO HyBAm en el Perú
- Adquirir y almacenar los datos hidrológicos y geoquímicos recopilados en el marco de las actividades del SO HyBAm en el Perú
- Generar crónicas hidro-sedimentarias y geoquímicas extensas y consistentes
- Sujeto a financiamiento, desarrollar la red hidrológica de manera racional para responder a los nuevos desafíos socioambientales de la región

Actividad 2 – Fortalecer los bancos de datos hidrológicos

Critica, curación y extensión de los datos en las estaciones HyBAm

Equipo de investigación y responsables (*)

IRD	SENAMHI
Dr. William SANTINI *	MSc. Nilton FUERTES *
Dr. Jonathan PRUNIER	MSc. Renato COLLADO
Ing. Christelle LAGANE	MSc. Jhonatan PEREZ
Dra. Joana ROUSSILON	

Descripción

Otra misión fundamental del SO HyBAm es producir y proporcionar series de datos hidrológicos robustas, criticadas, curadas y extensas, con alto nivel de calidad.



Metodología

- Los programas Hydraccess, Cormul e Hydromesad desarrollados por el SO HyBAm serán utilizados para analizar la consistencia de los datos. Otras aplicaciones o códigos podrán ser desarrollados en R o Python, con nuevos métodos de crítica y curación de los datos, en función de las necesidades.
- La regionalización, correlación múltiple y propagaciones (estadísticas o hidráulicas) entre estaciones para reconstruir series de datos podrán ser explorados mediante el *machine learning*
- Se utilizará también la **hidrología espacial** para complementar y/o criticar las series de datos *in situ*; en particular los programas y cadenas de tratamiento de datos satélites producidos por el SO HyBAm. Se usará el software VALS para la altimetría espacial (producción de estaciones virtuales) y las cadenas HyBAm de tratamiento como MOD3R e GETPAK para producir series de concentraciones en MES. Las series de datos producidas con satélites servirán para complementar y criticar los datos *in situ*.
- Se planificarán **campañas de calibración y validación** de los datos satélites en función de las necesidades y posibilidades.
- La calibración y/o la modelización de las curvas de descarga/gastos se harán con Hydraccess, con códigos R desarrollados específicamente para permitir el uso de métodos de modelización hidráulica y/o modelos estadísticos de ajuste no-lineales y más robustos que la simple regresión lineal, como el programa BARATINAGE del INRAE de Francia, con el método BARATIN, basado en estadísticas bayesianas
- Las relaciones [índice de concentración] - [concentración media en la sección] para el monitoreo de las MES serán reforzadas y calculadas con el modelo de Santini et al. (2019).
- Para fortalecer las series de datos de flujos de arenas en suspensión, se utilizarán modelos de transporte, así como datos derivados de las mediciones con aDcp (cf. Actividad 3)

Resultados esperados

- Bases de datos HyBAm extensas y consistentes
- Series de niveles con altimetría espacial (estaciones virtuales)
- Series de concentración en MES finas con sensoramiento remoto (estaciones virtuales)
- Series de flujos de arenas en suspensión con modelización y datos derivados de mediciones aDcp
- Informes técnicos sobre la calidad, la crítica y la curación de los datos
- Desarrollo de nuevos métodos de curación de datos
- Desarrollo de nuevos códigos o apps (R, Python) para procesar y curar datos hidrológicos



Actividad 3 – Innovar para fortalecer las bases de datos HyBAm

Probar e implementar nuevas tecnologías en hidrometría, definir nuevos protocolos innovadores, crear herramientas numéricas

Equipo de investigación y responsables (*)

IRD	SENAMHI
Dr. William SANTINI *	MSc. Nilton FUERTES *
Dr. Jean Michel MARTINEZ	MSc. Renato COLLADO
Dr. Jonathan PRUNIER	MSc. Jhonatan PEREZ
Ing. Christelle LAGANE	

Descripción

SO HyBAm es también un laboratorio para probar y desarrollar nuevas técnicas, protocolos de medición y software, para mejorar la calidad de sus bases de datos y construir peritajes fuertes en las instituciones que conforman el observatorio

Con el fin de mejorar continuamente la calidad de medición y aumentar la cantidad de información, se probarán nuevas tecnologías en hidrometría, eventualmente adaptadas al contexto e implementadas. De la misma manera, nuevos protocolos de medición hidro-sedimentaria robustos, optimizados, adaptados y eficientes serán desarrollados en conjunto. Estos trabajos se desarrollarán de acuerdo con los recursos financieros y humanos disponibles y las limitaciones técnicas y científicas. Su planificación será acordada entre los responsables de cada institución.

También se investigará como mejorar los protocolos de mediciones geoquímicas, con el equipo de especialistas del IRD y se probarán nuevas técnicas de medición de elementos químicos difíciles a determinar con precisión en los grandes ríos amazónicos, como por ejemplo los nutrientes.

Por fin, se tratará de crear una nueva herramienta de banco de datos en local (WISSKHy: *Wiki Soft Suite for Hydrology*), acopladas con varias herramientas para el tratamiento de datos hidrológicos y de calidad del agua, y aDcp.

Metodología:

- Desplegar nuevos instrumentos (aDcp RiverPro 600 kHz con antenas GNSS/Compass V200s, LISST-SL2 y ABS, altímetro, muestreadores Van Dorn ...) y desarrollo de herramientas en R para procesar los datos correspondientes
- Realizar mediciones de granulometría en paralelo y analizarlas con granulometro laser
- Conceptualizar, probar y aplicar nuevos protocolos de monitoreo *in situ* de las MES, con un enfoque particular sobre los flujos de arenas en suspensión, para mejorar los balances sedimentarios, en base al modelo hidráulico y la metodología de Santini et al. (2019)
- Realizar campañas de medición dedicadas a esas investigaciones, desplegando varios instrumentos
- Analizar el banco de datos HyBAm de mediciones aDcp con antena GPS/GNSS para investigar:



- la relación entre las velocidades aparentes de fondo móvil medidas por este instrumento y el arrastre de fondo,
- la relación entre retrodifusión de la señal acústica del aDcp con la concentración en arenas
- Calcular flujos puntuales de arenas a partir de la base de datos aDcp HybAm y utilizar esos flujos para comprobar leyes de transporte sólido
- Durante el periodo de vigencia de este convenio, también se podrán probar otros equipos y protocolos, de acuerdo con la vigilancia tecnológica que será asegurada por ambas partes y de las posibilidades financieras.

Resultados esperados

- Identificar, probar, adaptar e implementar nuevas tecnologías para la medición de flujo hidro-sedimentario
- Definir nuevas medidas hidro-sedimentarias robustas, optimizadas, adaptadas y eficientes
- Mejorar los protocolos de medición geoquímica y probar nuevas técnicas de medición
- Mejorar la calidad de las mediciones y el conocimiento de los flujos en los grandes ríos amazónicos
- Desarrollo de nuevas herramientas numéricas (R, Python, SQLite) para el tratamiento y la crítica de datos.

Actividad 4 – Innovación

Implementar un enfoque integrado de monitoreo hidro-sedimentario

Equipo de investigación y responsables (*)

IRD	SENAMHI
Dr. William SANTINI *	Dr. Waldo LAVADO *
Dra. Joana ROUSSILON	MSc. Nilton FUERTES
Dr. Jean Michel MARTINEZ	MSc. Jhonatan PEREZ
	MSc. Renato COLLADO

Desarrollo

Se implementará progresivamente un enfoque integrado para el monitoreo de los flujos hidro-sedimentarios (Santini, 2020; Santini et al., en preparación). De hecho, las herramientas de teledetección y de modelización hidrológica complementan ahora eficazmente los datos hidrológicos adquiridos *in situ*. Permiten extender la serie de mediciones y mejorar el monitoreo de las dinámicas espacio-temporales de la calidad del agua (sedimentos, contaminantes, etc.). Por lo tanto, son una alternativa para los servicios hidrológicos en las regiones con una baja densidad de estaciones hidrológicas, como lo es la Amazonía.



Metodología: un enfoque integrado para el monitoreo de los flujos hidro-sedimentarios

- Construir bases de datos *in situ* robustas y extensas (cf. Actividades 1, 2, 3)
- Definir una red de estaciones virtuales en función de la geomorfología, de las estaciones convencionales, y de las preguntas científicas
- Realizar campañas de medición dedicadas a la calibración/validación de productos satelitales y de modelos hidrológicos (cf. Actividad 2), con el objetivo de desarrollar este enfoque integrado para el monitoreo de los flujos hidro-sedimentarios
- Los datos de altimetría de las misiones espaciales (JASON, ENVISAT, ALTIKA, SENTINEL) se procesarán utilizando el software VALS, desarrollado por el equipo del SO HyBAm, para completar las mediciones *in situ* (cf. Actividades 1, 2 y 3)
- Un monitoreo por satélite de las concentraciones en MES se realizará a través del procesamiento de imágenes espaciales (MODIS, VIIRS, SENTINEL 2&3) (cf. Actividades 1, 2, 3)
- Desplegar el modelo hidrológico SWAT-HyBAm (Santini, 2020) en la cuenca del río Amazonas, posiblemente modificado en función de las necesidades, utilizando el producto PISCO del SENAMHI como entrada

Resultados esperados

- Una metodología de enfoque integrado del monitoreo hidro-sedimentario de los grandes ríos en la cuenca Amazónica, adaptando hidrología espacial y las técnicas de modelización hidrológica al contexto amazónico
- El desarrollo, en función de las necesidades de nuevos módulos, en la versión HyBAm del modelo SWAT, adaptada para los ríos Amazónicos
- Una modelización SWAT-HyBAm de las cuencas Ucayali, Marañón y Amazonas, operacional
- La producción de crónicas hidro-sedimentarias extensas y consistentes en estaciones virtuales, *i.e.* monitoreadas con mediciones satélite o con modelos hidrológicos
- Nuevos protocolos de medición sedimentaria para mejorar la estimación de los flujos de materias y asegurar la complementariedad con las herramientas de hidrología espacial (altimetría, color del agua) o con el modelado hidrológico utilizado (SWAT)

Actividad 5 – Investigaciones en hidro-climatología y erosión

Equipo de investigación y responsables (*)

IRD	SENAMHI
Dr. Jean Michel MARTINEZ *	Dr. Waldo LAVADO *



Dr. William SANTINI Dra. Joana ROUSSILON	MSc. Nilton FUERTES MSc. Jhonatan PEREZ MSc. Renato COLLADO
---	---

Descripción

Los resultados del monitoreo hidro-sedimentario serán analizados para establecer balances en las cuencas monitoreadas. En particular, las relaciones entre el clima y la erosión de las vertientes de la cordillera oriental y su zona sub-Andina adyacente, así que la influencia de la hidro-climatología sobre propagación de los flujos a través de las cuencas amazónicas peruanas será estudiadas.

Metodología

Esos trabajos se desinarán en conjunto, aprovechando de la fuerte pericia del SENAMHI en hidro-climatología y de la experiencia del IRD en esas investigaciones. Los productos de precipitación, los mapas climatológicos producidos por el SENAMHI serán utilizados con herramientas estadísticas para entender la génesis de los flujos. Con el modelo SWAT, escenarios de cambio de uso de suelos y de régimen de precipitación, a escala local (deforestación, intensificación/descenso de las lluvias en una región, cambio del régimen de escurrimiento...), serán simulados.

Resultados esperados

- Desarrollo de peritajes fuertes en el SENAMHI relacionados a la hidrología amazónica
- Una autonomía del personal del SENAMHI para la realización de mediciones hidro-sedimentarias, la bancarización de los datos y el análisis de su consistencia.
- La transferencia de experiencia en modelización hidrológica e hidrología espacial para establecer un monitoreo integrado de los flujos hidro-sedimentarios en las cuencas monitoreadas.
- La producción de datos hidrológicos consistentes.

Actividad 6 – Reforzamiento de capacidades

Capacitación y transferencias tecnológicas

Equipo de investigación y responsables (*)

IRD	SENAMHI
Dr. William SANTINI * Dra. Joana ROUSSILON Dr. Jean Michel MARTINEZ Dr. Jonathan PRUNIER	Dr. Waldo LAVADO *



Descripción

Para garantizar la producción de datos hidrológicos de calidad en el marco de las actividades del SO HyBAM en el Perú, es necesario reforzar las capacidades de cada institución involucrada, y eso de forma perdurable. En primer lugar, esas capacitaciones se referirán a la medición in situ de los flujos hidro-sedimentarios, siguiendo los protocolos del SO HyBAM, pero también a la bancarización de datos con los softwares desarrollados en el marco del SO HyBAM, así como al análisis de la consistencia de las series hidrológicas producidas. En particular, se prestará especial atención a las técnicas de calibración para las relaciones de nivel de agua-caudal. Las capacitaciones también cubrirán la introducción de técnicas de medición innovadoras (por ejemplo, mediciones sedimentarias indirectas con instrumentos acústicos o láser), el uso de la altimetría espacial o de modelos hidrológicos.

Para acompañar el desarrollo del potencial de las instituciones y capacitar a su personal, el IRD funciona en base a prácticas asociadas a la investigación científica. Es siempre con esta meta que el IRD desarrolla programas de investigación con sus socios. Estos programas tienen a la vez objetivos científicos, de producción de datos y de capacitación por la ciencia. El IRD hace prioritaria esta visión, la cual corresponde a una utilización óptima de sus recursos y experiencias.

Metodología

- Armar equipos de trabajo SENAMHI – IRD para trabajar en las actividades descritas aquí. Objetivo: practicar y asimilar nociones y herramientas haciendo investigación o participando en la investigación
- Proporcionar capacitación básica y teórica para los técnicos encargados de las mediciones y de los bancos de datos
- Proporcionar cursos avanzados en hidrometría, hidrología, modelización, sensoramiento remoto, en función de las necesidades de los equipos SENAMHI – IRD. Esos cursos serían responsabilidad del IRD y también de sus contrapartes en el HyBAM. Una de las ventajas de la red HyBAM es de poder contar con especialistas en los países donde trabaja, pero también de expertos extranjeros.
- Regionalizar las capacitaciones al nivel de la cuenca Amazónica para dinamizar los intercambios entre las instituciones de cada país y la red HyBAM
- Proporcionar capacitación en el campo durante las misiones HyBAM
- Dar 1 – 2 conferencias científicas al año sobre los resultados
- Conseguir fondos y becas de investigación para capacitar estudiantes hasta el doctorado

Resultados esperados

- Desarrollo de peritajes fuertes en el SENAMHI relacionados a la hidrología amazónica
- Una autonomía del personal del SENAMHI para la realización de mediciones hidro-sedimentarias, la bancarización de los datos y el análisis de su consistencia.



- La transferencia de experiencia en modelización hidrológica e hidrología espacial para establecer un monitoreo integrado de los flujos hidro-sedimentarios en las cuencas monitoreadas.
- La producción de datos hidrológicos consistentes.

Actividad 7 – Búsqueda de fondos adicionales para la investigación

Equipo de investigación y responsables (*)

IRD	SENAMHI
Dr. Jean Michel MARTINEZ *	Dr. Waldo LAVADO *
Dr. William SANTINI	
Dr. Jonathan PRUNIER	

Descripción

Las actividades de **observación** del SO HyBAm son financiadas, del lado francés por el IRD, el CNRS, la Universidad de Toulouse y por las 14 otras instituciones de los países de la cuenca amazónica, que conforman el SO HyBAm, participantes del SO definidas en el expediente de certificación del SO (2022-2026). Esos fondos contribuyen a sostener este esfuerzo de monitoreo continuo y a largo plazo, a través de la disponibilización de personales técnico y de laboratorio, de viáticos para las misiones, de financiamiento de campañas de medición, de compras de materiales e instrumentos científicos, etc.

Las actividades de investigación científica y los estudiantes correspondientes, fuera de la innovación para mejorar las mediciones, tienen que ser financiadas por proyectos y convocatorias.

También es importante buscar fondos adicionales a los dedicados a la observación durante el periodo de vigencia del presente convenio, para desarrollar proyectos de investigación puntuales y capacitar estudiantes hasta el nivel de doctor.

Compromisos del IRD y del SENAMHI

- El tratamiento, la consolidación de los datos hidrológicos y la fase de interpretación se llevarán a cabo conjuntamente por ambas partes, en Perú y Francia
- Los datos adquiridos en conjunto en las estaciones denominadas de “referencia” serán compartidos por las dos instituciones y podrán ponerse a disposición de la comunidad científica internacional con el acuerdo previo de ambas partes, en particular a través del portal web de SO HyBAm. Los datos obtenidos en las estaciones denominadas «SNO» se pondrán a disposición de todas las partes miembros de SO en Perú y de la comunidad internacional, en particular a través del portal web SO HyBAm.
- Los datos de monitoreo de niveles, flujo y concentración de las estaciones “SNO” de Borja (Marañón), Lagarto (Ucayali) y Puerto Alegria (Amazonas) serán



libres y abiertos para la comunidad científica e identificados como un producto de la colaboración entre SENAMHI y IRD en el marco del SO HyBAm. Los mismos datos correspondiente a las estaciones de "referencia" generadas en el marco del HyBAm podrán ser también liberados con el acuerdo previo de ambas partes. Por fin, los datos de aforos (líquidos y sólidos) serán reservados exclusivamente al uso interno SENAMHI, IRD y los participantes de SO HyBAm en el Perú definidos en el expediente de certificación del SO (2022-2026) con el objetivo de guardar el control de las curvas de calibración, las cuales tienen que ser generadas y certificadas por el SENAMHI para evitar la duplicación de fuente de datos. Con el acuerdo de los participantes de SO HyBAm en el Perú definidos en el expediente de certificación de SO (2022-2026), esos datos de aforo podrán ser liberados para fines de investigación o de estudios específicos.

- Las bases de datos HyBAm son dedicadas a la investigación. Se pueden realizar consultorías o acuerdos de investigación con el sector privado a condición de que la retribución correspondiente sea enteramente reinvertida en las actividades de SO HyBAm y los participantes del SO HyBAm sean de acuerdo para liberar los datos
- Los resultados obtenidos en conjunto en el marco de la presente convención serán co-publicados, en informes técnicos, revistas científicas internacionales o locales, e identificarán a las instituciones responsables del monitoreo y análisis de los datos
- Ambas partes buscarán financiamiento adicional para mejorar las condiciones de realización de los proyectos definidos y para garantizar la continuidad del trabajo científico.

El IRD se compromete a:

- Poner a disposición y enviar en misión, según sus posibilidades, al personal científico necesario para la realización óptima de las actividades de la convención.
- Proporcionar el software y los códigos requeridos por el proyecto.
- Proporcionar, en la medida de lo posible, un vehículo para realizar las actividades de campo
- Proporcionar equipos e instrumentos científicos necesarios

El SENAMHI se compromete a:

- Dar, según sus posibilidades, el apoyo logístico para la realización de las campañas de medición hidrológica previstas en el marco de la presente convención.
- Poner a disposición, a tiempo parcial y de acuerdo con sus posibilidades, las infraestructuras y el personal necesarios para la realización óptima de las actividades de la convención.
- Proporcionar observadores en las estaciones de la red hidrológica operada por el SO HyBAm.



- Proporcionar, en la medida de lo posible, un vehículo o un bote motorizado para realizar las actividades de campo.
- Proporcionar, en la medida de lo posible, un espacio de trabajo para el personal del IRD disponible o en misión.
- Proporcionar un espacio de trabajo para realizar las actividades de laboratorio necesarias (filtración MES en Iquitos).
- Proporcionar al proyecto los datos de lluvia y de nivel de agua diarios de las estaciones estudiadas, con la autorización previa de la dirección.
- Facilitar las relaciones de colaboración con otras organizaciones públicas o privadas en el Perú.

El IRD y el SENAMHI se comprometen a poner a disposición y enviar en misión, según sus posibilidades, al personal científico necesario para la ejecución de las actividades previstas en el convenio.



Institución	Personal	Función en el SO HyBAM y especialidad	Actividad	Participación *
IRD	Dr. Jean Michel MARTINEZ	Director del SO HyBAM Hidrología espacial Hidro-sedimentología Amazónica	1, 3, 4, 5, 6, 7	10%
IRD	Dr. William SANTINI	Director técnico del SO HyBAM Hidro-sedimentología Amazónica Modelización hidrológica Desarrollos informáticos (WiSSKhy) Responsable bancos de datos HyBAM	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	25%
IRD	Dra. Joana ROUSSILLON	Ing. en teledetección Hidrología espacial	3, 4, 6	10%
IRD	Ing. Christelle LAGANE	Ing. en geoquímica Geoquímica Mediciones <i>in situ</i>	1, 2, 3, 6	10%
IRD	Dr. Jonathan PRUNIER	Ing. en geoquímica Geoquímica Mediciones <i>in situ</i>	1, 2, 3, 6, 7	10%
SENAMHI (DHI)	Dr. Waldo LAVADO	Responsable HyBAM en el Perú Investigaciones en hidro-	1, 3, 4, 5, 6, 7	10%

	CASIMIRO	climatología y erosión Co-Coordinador técnico HyBAm Perú		
SENAM HI (DHI)	MSc. Nilton FUERTES	Responsable bancos de datos HyBAm Punto focal WiSSkHy Mediciones <i>in situ</i> Co-Coordinador técnico HyBAm Perú	1, 2, 3, 4, 5	10%
SENAM HI (DZ8)	MSc. Jhonatan PEREZ AREVALO	Responsable laboratorio HyBAm Iquitos Mediciones <i>in situ</i> Alimentación banco de datos	1, 2, 3, 4, 5	10%
SENAM HI (DHI)	MSc. Renato COLLADO	Ing. Hidrólogo Mediciones <i>in situ</i> Banco de datos	1, 2, 3, 4, 5	5%
SENAM HI (DZ8)	Marco PAREDES	Coordinación regional del SO HyBAm Hidro-climatología	1,	5%

* Con relación a un tiempo completo

Medios técnicos

Instrumentos científicos principales

NB: En el caso de los instrumentos científicos del IRD, estos son específica y exclusivamente dedicados a las actividades mencionadas en este documento o para otros proyectos involucrando el IRD.

IRD (~680 000 PEN)	SENAMHI
1 aDcp RDI, modelo Rio Grande, 600 kHz	1 bote para realizar mediciones con 1 motor de 200 HP
1 aDcp RDI, modelo RiverPro, 600 kHz	
1 antena GNSS Hemisphere A220 10Hz	
1 antena GNSS/Compass V200	
1 LISST-SL2 + 1 LISST ABS	
3 radiómetros hiperespectrales TRIOS	
1 laptop de campo	
2 muestreadores para sedimentos tipo Van Dorn de 2L	
2 muestreadores para sedimentos tipo "granada" ("rising stage")	
1 winche eléctrico Cannon	
2 niveles óptico	
1 rampa de filtración para laboratorio (En el SENAMHI)	
1 bomba de vacío (En el SENAMHI)	



<p>1 balance de precisión (en el SENAMHI) 1 pHmetro (en el SENAMHI) 1 conductímetro (en el SENAMHI) Pequeños materiales de laboratorio o destinados a los observadores para la recolección de datos sedimentarios y geoquímicos.</p>	
---	--

Otros medios técnicos para realizar las actividades

IRD	ISENAMHI
<p>Software y los códigos requeridos por el proyecto (Hydraccess, Hydromesad y VALS) Vehículos 4x4 Hilux para realizar las actividades de campo Laboratorios de análisis geoquímica en Francia (UMR GET)</p>	<p>1 espacio para un laboratorio de filtración MES en Iquitos Eventualmente 1 espacio de trabajo para el personal del IRD en misión 1 deposito para los materiales de 2-3 m³ Infraestructura necesaria (ej. taller aulas de curso, ...) para la realización óptima de las actividades de la convención</p>



Referencias

Martinez, J. M., Espinoza-Villar, R., Armijos, E., Moreira, L. S.: The optical properties of river and floodplain waters in the Amazon River Basin: Implications for satellite-based measurements of suspended particulate matter, *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, 120(7), 1274–1287, <https://doi.org/10.1002/2014JF003404>, **2015**.

Santini, W., Camenen, B., Le Coz, J., Vauchel, P., Guyot, J. L., Lavado, W., Carranza, J., Paredes, M. A., Pérez Arévalo, J. J., Arévalo, N., Espinoza-Villar, R., Julien, F., Martinez, J. M.: An index concentration method for suspended load monitoring in large rivers of the Amazonian foreland, *Earth Surf. Dynam.*, 7, 515–536, <https://doi.org/10.5194/esurf-7-515-2019>, **2019**.

Santini, W. : Caractérisation de la dynamique hydro-sédimentaire du bassin de l'Ucayali (Pérou), par une approche intégrant réseau de mesures, télédétection et modélisation hydrologique, Thèse de doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier, Toulouse, 470 pages. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32547.60964>, **février 2020**.



