

Informe:

“Elaboración del Informe de Inventario de Humedales de la Cuenca Olaroz – Cauchari en la provincia de Jujuy – Nivel 2”

Investigador Responsable: Andrea E. Izquierdo

Grupo colaborador: Javier Foguet, Julieta Carilla

1. Resumen Ejecutivo

El presente Plan de Trabajo se enmarca en la solicitud realizada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación con el objetivo de llevar a cabo un plan piloto de inventario de humedales a fin de prever cuestiones técnicas de éste tipo de relevamientos para ser replicadas en el futuro Inventario Nacional de Humedales. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable solicitó realizar el Plan Piloto de Humedales de la Puna (Nivel 2) en la cuenca Olaroz-Cauchari de la provincia de Jujuy debido al creciente interés de la zona por sus recursos minerales, específicamente litio, lo cual puede tener implicancias aun no evaluadas para los recursos hídricos de la región.

Objetivos de los proyectos pilotos

En dicho marco, el MAYDS se planteó como **Objetivos Generales** de los proyectos pilotos:

- Generar información sobre la distribución y presencia de humedales en áreas prioritarias designadas, como herramienta para su gestión y ordenamiento ambiental.
- Desarrollar experiencias de inventario y delimitación de humedales en la Cuenca Olaroz-Cauchari, que puedan ser replicables para avanzar con el Inventario Nacional de Humedales.

Objetivos del Piloto Inventario de Humedales de la Cuenca Olaroz – Cauchari (Jujuy) – Nivel 2

La Puna argentina se caracteriza por un alto valor de conservación de la biodiversidad de ambientes extremos, que experimenta grandes cambios territoriales asociados a la globalización socioeconómica, incluyendo (1) reducción de la población rural y el pastoreo (Izquierdo y Grau 2009, Izquierdo et al en consideración), el uso tradicional más extendido; (2) incipiente expansión de la minería, especialmente de Litio y posiblemente de otros minerales más valiosos (Izquierdo et al 2015); (3) tendencia climática hacia la aridización (Carilla et al 2013); y (4) consolidación de los derechos de las comunidades indígenas nativas. Adicionalmente la región tiene un amplio potencial de turismo y ecoturismo, dada la creciente valoración de sus recursos escénicos y sus servicios ecosistémicos por parte de las poblaciones externas a la Puna. La interacción entre estas tendencias conlleva una variedad de amenazas y oportunidades tanto para los recursos naturales (biodiversidad, servicios ecosistémicos), como para los distintos actores sociales; que por superposición de actividades productivas, y diferentes cosmovisiones de desarrollo o planes de vida derivan en conflictos territoriales crecientes (FARN 2009).

Entre los recursos escasos y típicamente sujetos a conflictos de intereses en la región se encuentran los recursos hídricos y los humedales. Los recursos hídricos deben responder a múltiples demandas humanas (i.e. doméstica, industrial, agrícola) y al mantenimiento de los ecosistemas naturales (Mincyt 2015). Así, los organismos tomadores de decisiones y planificación territorial, afrontan el desafío de gestionar y desarrollar de forma sostenible recursos sometidos a las presiones del crecimiento económico y el aumento de la población; y a las amenazas del cambio climático (Mincyt 2015).

Una de las primeras y más relevante información para resolver estos desafíos es el Inventario de Recursos Naturales, en éste caso en particular el Inventario de Humedales. En este sentido la Convención de Ramsar sobre los Humedales ha reconocido la importancia y necesidad de los inventarios nacionales como instrumentos esenciales para conformar políticas y medidas destinadas a alcanzar la conservación y el uso racional de sus humedales (Secretaría de la Convención de Ramsar 2010).

En éste proyecto piloto de inventario de humedales de la cuenca Olaroz-Cauchari , nivel 2; el Instituto de Ecología Regional (IER) tiene como objetivos:

- 1) Proponer una tipología apropiada para los humedales presentes en el área piloto considerando su validez para humedales altoandinos en general.
- 2) Realizar la identificación y delimitación espacial de los humedales de la Cuenca Olaroz-Cauchari a escala $\geq 1:100.000$.
- 3) Realizar caracterización de ambientes en base a grupos funcionales de vegetación de la Cuenca Olaroz-Cauchari a escala ≥ 100.000 .
- 4) Realizar una aproximación a un análisis de vulnerabilidad de humedales de la cuenca Olaroz-Cauchari en base la variabilidad interanual del NDVI y características físicas, geográficas y topográficas de los humedales y variables climáticas de la región.
- 5) Realizar caracterización socioeconómica de la cuenca a escala de paisaje incluyendo variables demográficas, uso del territorio y servicios ecosistémicos.

2. Antecedentes

2.1- *Definición de una tipología de humedales relevantes para la Puna*

Un primer paso para el estudio de los humedales es definir y clasificar sus distintos tipos. En general se acepta que los humedales son zonas en las que el agua es el principal factor que controla el medio y la vida vegetal y animal asociada a ellos. Se desarrollan en lugares donde la capa freática se encuentra en o cerca de la superficie de la tierra o donde el suelo está cubierto de agua poco profunda. A pesar de la amplia utilización del término, la definición de humedal todavía no está completamente consensuada aunque tiene importantes implicancias para los lineamientos en manejo y conservación de estos sistemas (Neiff, 2001).

La definición más difundida suele ser la de la Convención de Ramsar, tratado intergubernamental que ofrece el marco para la conservación y el uso racional de los humedales y sus recursos del cual Argentina es miembro. Esta definición emplea un criterio amplio y enumerativo definiendo a los humedales como “las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”. Con esta amplia definición, la Convención de Ramsar abarca todos los lagos y ríos, acuíferos subterráneos, pantanos y marismas, pastizales húmedos, turberas, oasis, estuarios, deltas y bajos de marea, manglares y otras zonas costeras, arrecifes coralinos, y sitios artificiales como estanques piscícolas, arrozales, reservorios y salinas.

Otras definiciones más específicas se basan en características propias de los humedales y los definen como “ambientes en los cuales la presencia temporaria o permanente de agua superficial o subsuperficial causa flujos biogeoquímicos propios, suelos con acentuado hidromorfismo y una biota adaptada a dicho rango de disponibilidad de agua” (Neiff et al., 1994). Esta definición especificando aspectos estructurales y funcionales propios de los humedales marca la diferencia de éstos con los ambientes netamente terrestres y con los ambientes netamente acuáticos. Por un lado, en los sistemas terrestres la zona saturada se encuentra por debajo de la rizósfera (i.e., 30-50 cm superiores del suelo donde se encuentra la mayor parte de las raíces) y los procesos biológicos tienen lugar en la zona aérea, mientras que en los sistemas acuáticos el agua está sobre el nivel aéreo de la biota y los procesos biológicos ocurren dentro de la columna de agua (Brinson, 2004; Benzaquén et al., 2013). En los humedales la zona de saturación fluctúa entre los primeros niveles subsuperficiales del suelo (incluyendo la rizósfera) y los primeros niveles por sobre la superficie del suelo; los procesos biológicos están adaptados a esta fluctuación en la disponibilidad de agua (Brinson, 2004; Benzaquén et al., 2013). Estrictamente bajo esta definición los sistemas acuáticos permanentes cuya columna de agua mantenga niveles altos y constantes de flujo, como ríos y

lagos permanentes, no serían humedales; pero sí podría incluirse como humedal al ecosistema ribereño sujeto a periódicas inundaciones por aumentos del caudal del sistema acuático (i.e., humedal marginal fluvial en el caso de los ríos y humedal marginal lacustre en el caso de riberas de lagos y lagunas profundas). Un caso particular y de alta relevancia para la Puna, son las vegas o bofedales que si bien cumplen con los rasgos de todo humedal (i.e., presencia de agua temporaria o permanente, biota adaptada y ciclos biogeoquímicos propios) la causalidad del ecosistema podría discutirse considerando más bien que hay un ciclo de retroalimentación entre los componentes que crean y mantienen el sistema (E. Jobaggy, com. pers.). Si bien las vegas se originan por afloramientos del acuífero freático, ésta se mantiene cerca o en superficie debido a que la vegetación característica de la vega promueve la acumulación de materia orgánica y modifica la hidrología del lugar con su capacidad de retención y regulación del flujo del agua. Si la vegetación no mantuviera el agua bajo su cubierta, ésta podría circular y formar otro tipo de humedal o sistema netamente acuático, como arroyos o ríos, típicamente menos extendidos espacialmente que la vega.

En definitiva, la definición de humedales ha sido ampliamente discutida y continúa sin alcanzar un consenso global definitivo. Las diferencias pueden deberse principalmente a los distintos propósitos con el que son planteadas. En ese aspecto, en el Taller “Inventario Nacional de Humedales”, en el marco en el cual se desarrolla éste proyecto, se consensó entre los participantes una definición que regiría los Pilotos planteados y por ende, el proceso del Inventario Nacional de Humedales. Dicha definición reza: **“En el marco del inventario nacional, humedal es un ambiente en el cual la presencia temporaria o permanente de agua superficial o sub-superficial causa flujos biogeoquímicos propios y diferentes a los ambientes terrestres y acuáticos. Rasgos distintivos son la presencia de biota adaptada a estas condiciones, comúnmente plantas hidrófitas, y/o suelos hídricos o sustratos con rasgos de hidromorfismo.”** (MAyDS 2016)

Siguiendo esta definición, en el caso de la Puna se podrían definir como humedales naturales a ríos (permanentes y transitorios); lagos y lagunas; vegas; salares (Figura 1-D). Adicionalmente bajo esta definición también cabría considerar humedales artificiales como resultan ser las pozas de evaporación y diques de cola de explotaciones mineras (Figura 1E-G).



Figura 1: Ejemplos de humedales de la Puna. Río Los Patos, Salta (A); Laguna Grande, Catamarca (B); Vega Incachule, Salta (C); Salar Antofalla, Catamarca (C); Pozas de evaporación para explotación de litio en Olaroz, Jujuy (D); pozas de evaporación para producción de sal en Rincón, Salta (F); dique de cola Mina Alumbrera, Catamarca (G)

Los sistemas de clasificación de humedales existentes también son numerosos y difieren en los criterios en los que se basan; muchas veces debido al objetivo con el que fueron planteados. Algunos casos fueron ejercicios académicos o de gestión con foco global (e.g. Ramsar 1990), mientras otros casos tuvieron objetivos regionales (e.g. Cowardin et al. 1979; Gopal and Sah 1995) o sistemas específicos con carácter local y necesidades de manejo concretas (e.g. Gu et al. 2007)

Clasificaciones como las de Cowardin et al. (1979) y Ramsar están inherentemente relacionadas a atributos biológicos, mientras otros sistemas se han basado más bien en características geomorfológicas o hidrológicas (Semeinuk y Seimeinuk 1995, Finlayson et al., 2002). Los sistemas basados en atributos biológicos han sido señalados a veces como causantes de superposición en algunas categorías de humedales en algunas instancias y en divisiones innecesarias en otras (Berlanga-Robles et al. 2007). Sin embargo, también se señalan como ventajas de estos sistemas: 1) alto grado de consistencia y objetividad (Abarca y Cervantes, 1996); 2) el uso de formas de vida para definir clases; lo cual facilita la definición sin necesidad de un conocimiento biológico profundo (Berlanga-Robles et al. 2007) y además; 3) que las formas de vida pueden ser reconocidas por sensores remotos (Cowardin et al. 1979) facilitando el trabajo a escalas regionales como suelen ser los inventarios de humedales.

Adicionalmente, el considerar éstos atributos tendría alto valor para la conservación; ya que provee la posibilidad de a través de la protección del sistema (humedal en este caso) proteger los atributos biológicos de los mismos, actuando así éste como un “ecosistema paraguas”.

Por su parte, los sistemas basados en geomorfología o hidrología pueden por un lado ser más precisos en la separación de algunas clases (Berlanga-Robles et al. 2007), pero necesitan muchas veces de información muy detallada que puede ser difícil de recopilar o lenta de generar especialmente a grandes extensiones; como por ejemplo información climática para definir hidrología (i.e. régimen de agua). Esto último puede ser particularmente una limitante importante en la Puna donde se tiene muy poca información climática e hidrológica relevada.

Considerando ventajas y desventajas de los diferentes sistemas existentes; las características de la eco-región de la Puna pero también sin perder de vista la inserción de éste en el futuro Inventario Nacional de Humedales; es que se propone aquí una clasificación de humedales de la Puna que pudiera combinarse o insertarse en la clasificación nacional (Tabla 1).



Tabla 1: Sistema de clasificación propuesto para humedales de la Puna en el presente trabajo.

Sistema ^A	Sub-sistema ^B (ecológico)	Clase	Tipo	Sub-tipos unidades ecológicas
Continental	Ribereño	Río	Perennes Transitorios	
		Arroyo	Perenne Transitorios	
	Lacustre	Lagos	Lagos de agua dulce Lagos salados	Con hidrofitas Sin hidrofitas
		Lagunas	Lagunas de agua dulce	Con hidrofitas
			Lagunas profundas y salinas	Con hidrofitas Sin hidrofitas
			Lagunas someras e hipersalinas	Con hidrofitas Sin hidrofitas
		Salares	Barreales ^C Salitrales cordilleranos típicos ^C Salinas cordilleranas ^C Salares cordilleranos auténticos o “clásicos” ^C	



			Salares terrosos ^c	
	Palustre	Vegas	Altoandinas -alcalinas -neutras -ácidas Puneñas -alcalinas -neutras -ácidas	De cojín Arbustales/juncales
Artificiales		Pozas de explotación minera	-	-
		Canales de riego	-	-

^A Primer nivel jerárquico según la propuesta de Ramsar. En éste nivel se podría incluir la categoría Marinos y/o costeros para agregar humedales de otras eco-regiones del país.

^B Basados en atributos ecológicos y propuestos como “sistema ecológico” en Cowardin et al. 1979

^c Clasificación de Salares propuesta por el Dr. R. Pereyra (com. pers)

Identificación y delimitación espacial de los humedales de la Cuenca Olaroz-Cauchari a escala $\geq 1:100.000$.

Área de Estudio: caracterización socioeconómica de la cuenca a escala de paisaje incluyendo variables demográficas, uso del territorio y servicios ecosistémicos

La cuenca en estudio ocupa 58.882 km² (Figura 1), se extiende principalmente de norte a sur y contiene a ambos salares homónimo; i.e. salar Olaroz (al norte) y Cauchari (al sur).

El clima es árido con precipitaciones anuales promedio de 60mm concentradas en verano. La tasa de evaporación es mayor que las precipitaciones por lo cual la región tiene un déficit hídrico neto natural que convierte al agua en el principal recurso limitante de la región. La sub-cuenca se clasifica según Izquierdo et al. 2015 dentro de la clase de cuenca de alta altitud y bajo porcentaje de cobertura de vegas. La cuenca tiene una altitud media de 4253 msnm con alturas máximas de 6136 y mínima de 3865 msnm (Figura 1). La variable del porcentaje de vegas es relativa al resto de las cuencas consideradas en el agrupamiento en Izquierdo et al. 2015, pero en dicho estudio se reportan 298 vegas; 0,15% del total del área de la cuenca. Estos valores serán revisados a la luz de la clasificación a escala de cuenca del presente estudio piloto.

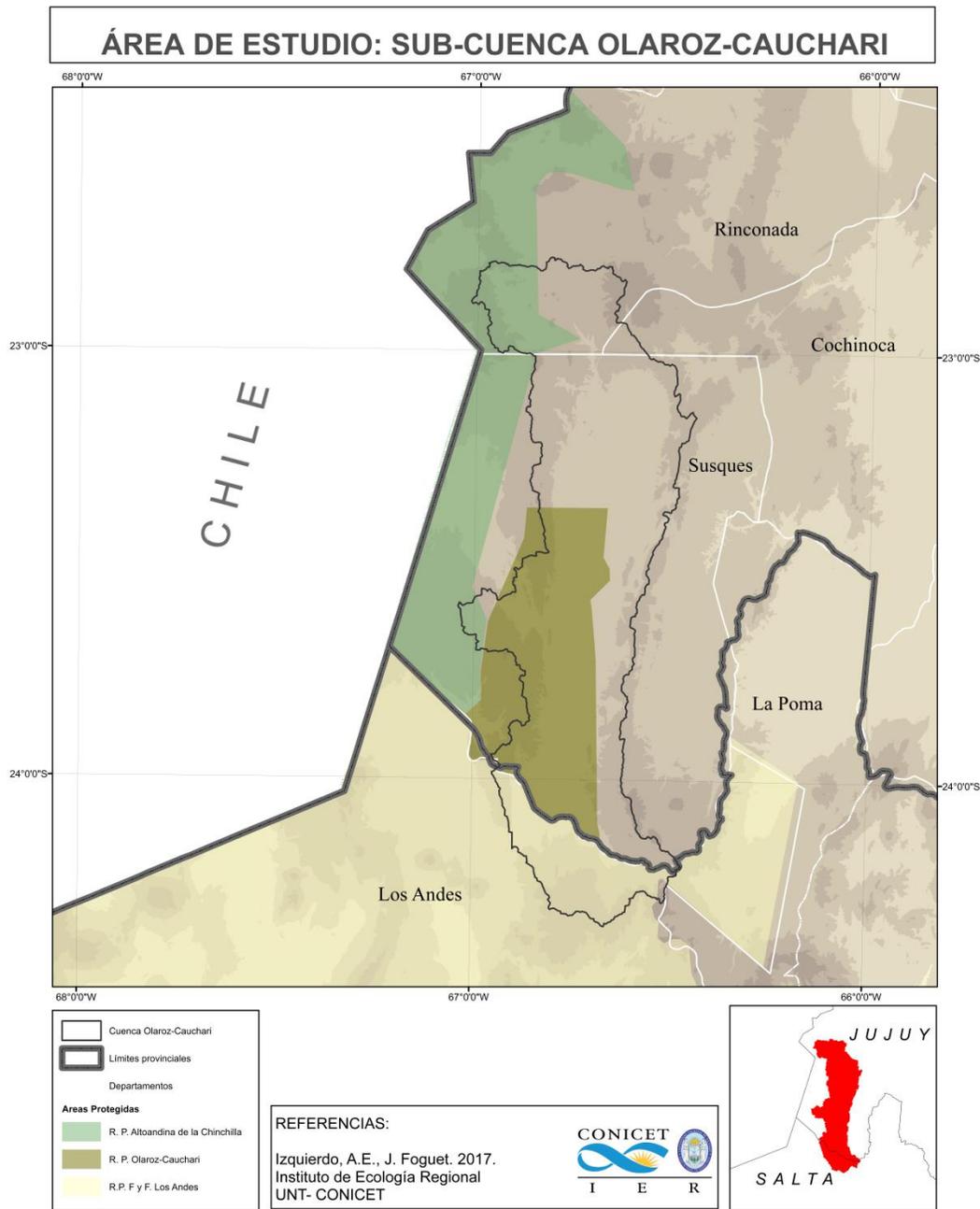


Figura 1: Área de estudio, cuenca Olaroz-Cauchari



En la provincia de Jujuy la cuenca se encuentra en los departamentos de Susques y Rinconada; mientras que el extremo sur de la cuenca pertenece al departamento Los Andes de la provincia de Salta (Figura 1). La población de éstos departamentos es clasificada en base a criterios demográficos como población rural en su totalidad (Tabla 2) ; ya que ninguna localidad supera los 2000 habitantes que es el umbral definido por INDEC para considerar una población urbana. En el departamento Rinconada la mayor población se concentra en la localidad de Rinconada, cabecera del departamento, con 364 habitantes (INDEC 2010). Mientras que en el departamento de Susques, la cabecera (Susques) cuenta con 1140 habitantes y el resto de las localidades con menos de 500 habitantes en 2010 (INDEC 2010)

Tabla 2: población por localidad de los departamentos Rinconada y Susques de Jujuy; y Los Andes de Salta desde 1960 a 2010.

Provincia	Departamento	Localidad	1960	1970	1980	1991	2001	2010
JUJUY	Rinconada	Rinconada	782			372	364	351
		Lagunillas de Farallón				(a)	149	264
		Nuevo Pirquitas (18)	512			.	147	672
		Liviara				(a)	63	46
		Mina Pirquitas	512	1,118	1,324	/	/	/
	Susques	Susques	537			1,093	1,140	1611
		Coranzuli	351			324	412	333
		Catua	174			219	368	480
		El Toro				61	212	121
		Huáncar				128	201	133
		Olaroz Chico				(a)	183	226
		Puesto Sey (17)	318			75	150	94
		Pastos Chicos				100	104	104
		San Juan de Quillaqués				110	75	72
Mina Providencia				95	9	30		
SALTA	Los Andes	San Antonio de los Cobres	1,439	1,947	2,357	3,155	4,274	4763
		Olacapato				(a)	186	218
		Santa Rosa de los Pastos				(a)	136	168

		Grandes						
		Tolar Grande	379			120	119	230

(a) El dato del Censo de 1991 no es comparable por incluir población rural dispersa.

Mina Pirquitas no existe actualmente.

(18) Nuevo Pirquitas corresponde a la nueva ubicación luego del cierre de la mina

(17) Conocida también como Sey

La cuenca está incluida en un 49% de su superficie total (2.844 km²) dentro de límites de áreas protegidas (Figura 1). En el centro sur e incluyendo a la mayor parte de ambos núcleos de salar se encuentra la Reserva Pcial. De Flora y Fauna Olaroz-Cauchari que fue creada en 1981 con el principal objetivo de recuperación de la vicuña (Chebez 2005). Al Oeste ésta reserva limita con la Reserva Provincial Altoandina de la Chinchilla que también incluye el extremo noroeste de la cuenca; mientras que el extremo sudoeste de la misma está dentro de los límites de la Reserva Provincial Los Andes de la provincia de Salta (Figura 1) (Chebez 2005). Aunque éste análisis basado en superficies bajo protección puede ser alentador (i.e. gran parte de la cuenca y sus área buffer está bajo algún marco de protección); la situación respecto a su gestión debe ser analizada en profundidad. En general, la implementación de las áreas protegidas provinciales es baja; con carencias básicas como catastro formalmente asentado, planes de manejo o personal, tanto de control como técnico (Reid Rata et al., en prensa).

La principal actividad de la población local en la cuenca históricamente ha sido la ganadería de subsistencia combinada con trabajo asalariado en minería y el empleo público. Aunque las estadísticas son difíciles de obtener (si es que existen); es probable que la relación de dependencia en puestos de trabajo en proyectos mineros y/o públicos haya incrementado en los últimos años de mano del creciente interés minero en la región y de modelos políticos aplicados (Izquierdo et al. *en revisión*).

Desde fines del 2015, en el Salar de Olaroz opera Sales de Jujuy; empresa minera dedicada a la producción de litio. La empresa está formada por tres socios estratégicos: Orocobre, la reconocida extractora australiana de litio; la automotriz japonesa Toyota; y JEMSE (Jujuy Energía y Minería Sociedad del Estado), la estatal jujeña.

Materiales y métodos

Como primer paso se procedió a la delimitación de los límites de la sub-cuenca Olaroz Cauchari a través de la delimitación automática basada en un MDE y cálculo de dirección de flujos con Arc-Hidrology del programa ArcGis 10.1 y posterior edición manual.

Para el mapeo de humedales se realizaron dos líneas de procesamiento: a) clasificación supervisada sobre imágenes Landsat TM con píxeles de 30x30 y nivel de pre-procesamiento LT1 (http://landsat.usgs.gov/descriptions_for_the_levels_of_processing.php) para “salar”; b) para turberas, lagos, lagunas y sistemas artificiales se utilizó clasificación de imágenes Sentinel 2 a través del Google Engine; y c) se generó una capa de hidrología a través de procesamiento automático.

Para la clasificación de salares se siguió una metodología en dos pasos. A partir de un análisis exploratorio con clasificación no supervisada K-means, se optó por considerar como “salar” a una variedad de subclases temático-espectrales que incluyeran la mayor cantidad posible de atributos espectrales de los distintos **tipos** de salares: i.e. blancos, oscuros, rugosos. Posteriormente, se llevó a cabo la clasificación supervisada utilizando el algoritmo de máxima verosimilitud sobre las 7 bandas originales y una máscara que deja fuera del análisis a las porciones de terreno con pendientes mayores al 1 %. Los datos de entrenamiento fueron obtenidos a partir de puntos georeferenciados de entrenamiento conocidos para cada clase. Las sub-clases espectrales fueron agrupadas en una única clase “salar” ya que la clasificación de subclases en éste caso fue solo basada en atributos espectrales no diferenciando los atributos biológicos que definirían los distintos **tipos** de salares. Finalmente se realizó la agregación espacial de polígonos adyacentes clasificados como salar con la finalidad de darle unidad espacial a las unidades ecológicas.

Para la clasificación de vegas, lagos, lagunas y sistemas artificiales se utilizaron imágenes del satélite Sentinel 2, Multispectral Instrument incluidas en el catálogo de Google Earth Engine. Estas escenas se encuentran ortorectificadas y proveen valores de reflectancia al tope de atmósfera (TOA) desde junio del 2015. Espectralmente son similares a las escenas Landsat (utilizadas en mapeos anteriores de humedales de puna) pero con una resolución espacial en el rango del visible y el infrarrojo cercano, de 10 metros. El procedimiento incluyó tres pasos: armado de mosaico, generación de máscara, clasificación propiamente dicha.

Para el armado de un mosaico se utilizaron algoritmos de la plataforma en la nube Google Earth Engine. Puntualmente se generó un compuesto-mosaico que maximiza el verdor del área de estudio. El mosaico resultante es un compuesto de los píxeles más “verdes” de una colección de más de 100 escenas Sentinel de los últimos dos años (Figura 2). El verdor se define en función del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

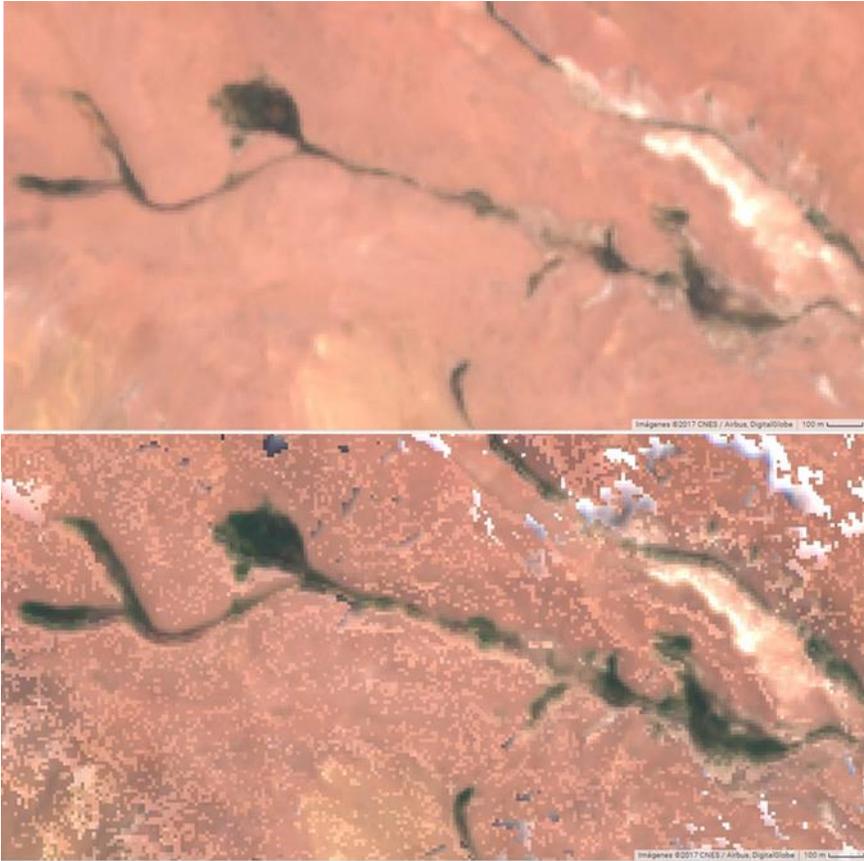


Figura 2: (A) Compuesto basado en la mediana. (B) compuesto que maximiza NDVI

Al presentar valores de NDVI muy bajos, las nubes quedan automáticamente descartadas en los sitios donde el mosaico encontró verdor. Dadas la baja nubosidad de la puna y la buena cobertura temporal de escenas Sentinel, el mosaico favorece la captación de vegas más pequeñas cuya productividad varía mucho dentro de una estación y entre estaciones. Es dable esperar pocos errores de omisión debido a condiciones climáticas. Por otro lado, el mosaico de máximo verdor puede presentar falsos positivos que se encuentran en el filo entre la nube y la sombra de nube (Figura 3A). Estos pixeles presentan valores relativamente bajos en la longitud del rojo y valores relativamente altos en el infrarrojo cercano; es decir, muestran el comportamiento típico de la vegetación. Al definir un umbral de NDVI estos pixeles pueden quedar marcados como vegetación. Para resolver este problema se generó una máscara (Figura 3B) que reduzca el universo sobre el cual se lleva a cabo el mapeo final de los humedales basada en un índice de vegetación que resultan efectivos para resaltar la diferencia cobertura vegetal – no vegetal.

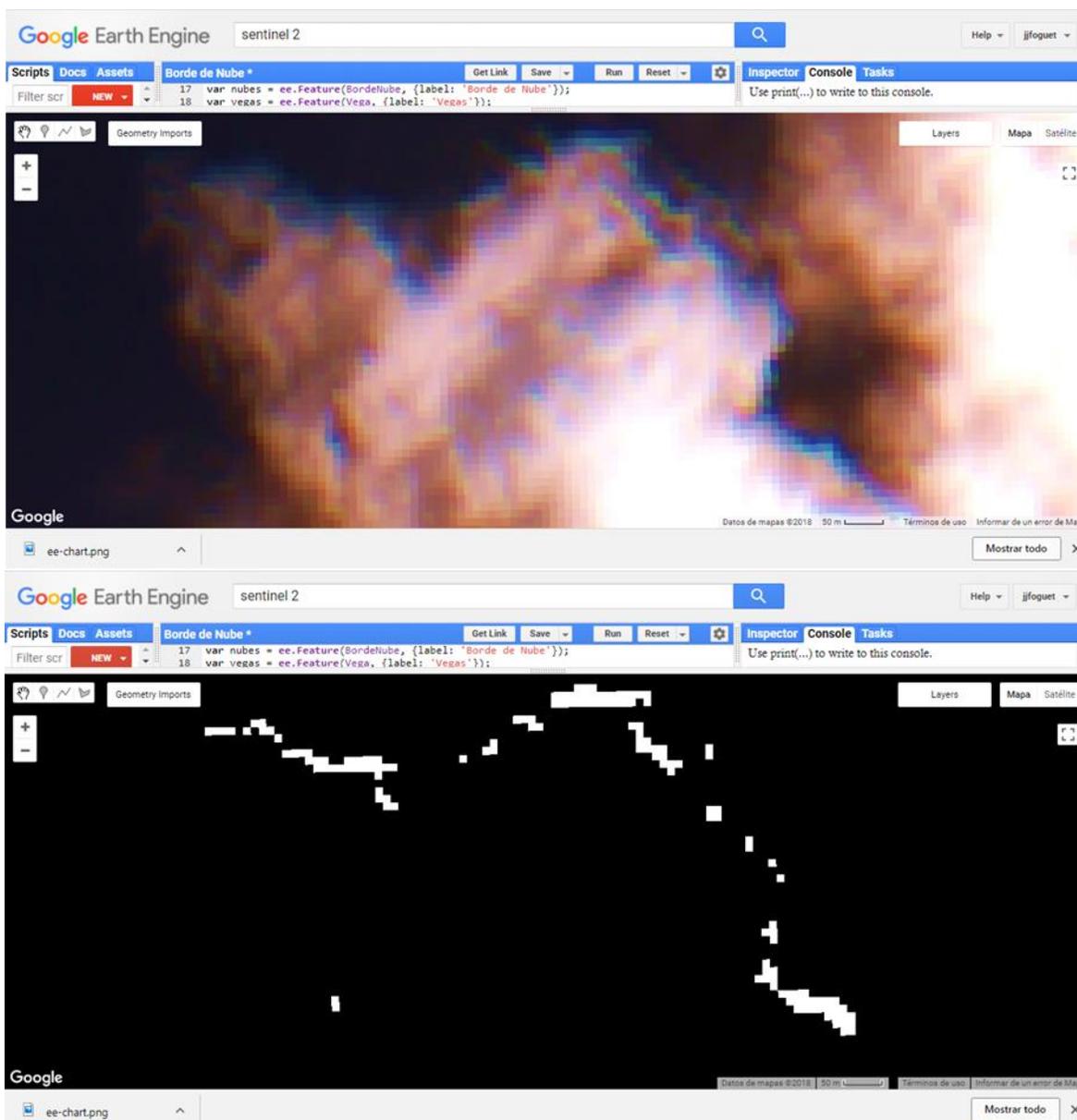


Figura 3: (A) Pixeles ‘verdes’ entre nube y sombra de nube. (B) , ndvi umbral ≥ 0.20 .

La máscara de vegetación se define a partir de un conjunto bien distribuido de datos dicotómicos (vegetación, no vegetación) obtenidos en campo o en imágenes de alta resolución espacial que

validan iterativamente modelos de vegetación basados en umbrales de ndvi. La función que se optimiza tiene un doble objetivo: maximizar la confiabilidad general minimizando los errores de omisión para la clase vegetación. De este modo se logra una máscara incluyente.

A partir de nuestros análisis previos en la Puna podemos esperar que en cuencas secas un umbral de NDVI de 0.20 recoja casi exclusivamente vegas. En cuencas húmedas como la de Olaroz, un umbral de NDVI mayor o igual a 0.20 capta las vegas y los parches de arbustales más densos y húmedos muchas veces asociados espacialmente a un núcleo o eje de cobertura de vega. Este umbral de NDVI no capta los tolares o campos de *Festuca*. A una resolución espacial de 10 metros, las vegas suelen presentar una cobertura más densa que otros tipos de vegetación de la puna (arbustales, tolares) y por ende aparecen con valores de NDVI más altos. Los pixeles de vegas son pixeles puros y presentan la firma espectral típica de la vegetación. Por su parte, la mayoría de los pixeles de arbustales son pixeles mixtos con una buena proporción de suelo desnudo.

Una vez definido el umbral de NDVI se limpiaron los falsos positivos introducidos por la metodología de mosaikueo. La mayoría de estos pixeles anómalos pueden ser descartados con una regla de decisión sencilla: para ser vegetación un pixel debe tener un ndvi mayor a 0.20 y su reflectancia en el azul debe ser menor a su reflectancia en el tercer borde del rojo:

$$\text{Vegetación} = \text{NDVI} \geq 0.20 \text{ AND 'blue'} < \text{'red edge 3'}$$

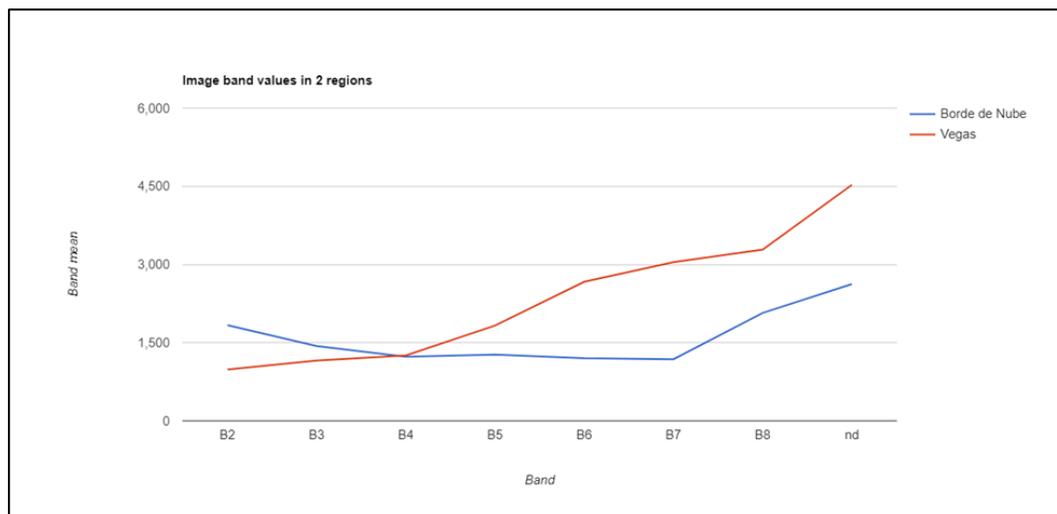


Figura 4: Firmas espectrales de vegas y bordes de nubes

Finalmente sobre éste mosaico “verde” corregido por la máscara de vegetación se realizó la clasificación final de turberas. Para una porción importante de la puna, la definición de la máscara de vegetación es equivalente al mapeo de vegas. Para separar coberturas dentro de la máscara de vegetación se utiliza una rutina típica de clasificación digital con datos de entrenamiento y validación obtenidos en campo y en imágenes de alta resolución espacial. Se probaron distintos clasificadores digitales (svm, random forest, cart, naive bayesian). La confiabilidad general del mosaico clasificado se resume en la Tabla 3. En la versión final del mapa presentado en este proyecto se usó el clasificador SVM porque la confiabilidad entre los diferentes clasificadores fue similar y SVM dio un mapa más continuo respetando mejor la forma de los polígonos

Tabla 3: Confiabilidad de los diferentes clasificadores probados

Clasificadores	Accuracy
Cart	0.92
Continuous Naive Bayesian	0.91
Random Forest	0.90
Support Vector Machine	0.89

En el post procesamiento se filtran los grupos de hasta dos pixeles aislados, obteniéndose una unidad mínima de mapeo de ~1/2ha? . Esta capa se vectoriza y se importa a google earth para una última revisión con imágenes de muy alta resolución espacial.

Una vez obtenida la capa vectorial de vegas, se las separó en pisos altitudinales siguiendo un ordenamiento basado en un set de vegas altoandinas que representan más ampliamente las características de este tipo de humedales. Finalmente se evaluó a campo la correspondencia de las vegas de la subcuenca de Olaroz-Cauchari a las comunidades vegetales esperables dadas sus atributos geográficos. Los criterios y variables se detallan en los resultados.

Para mapear agua se utilizaron la misma colección de imágenes satelitales y la misma técnica de mosaqueo usadas para mapear vegas. Para lograr el mosaico de “máxima humedad” se probaron los dos índices de agua más conocidos: normalized difference wáter index ‘NDWI’ (Mc Feeters, 1996) y modified normalized difference index ‘MNDWI’ (XU, 2006). El segundo mejora la separación de agua con zonas urbanas y algunos tipos de suelo, pero mezcla junto al agua las nubes y la nieve muy presente en el ambiente de puna. Para maximizar la humedad del mosaico se utilizó el NDWI, menos sensible a las nubes y a la nieve. Los índices realzan la señal del agua pero resulta necesario ajustar localmente el umbral del ‘agua’. Para ello se utilizaron muestras de agua y no agua tomadas en imágenes de alta resolución y en mosaicos estacionales armados con

imágenes Sentinel. A partir de este conjunto de muestras se clasificaron y validaron iterativamente distintos modelos de agua basados en umbrales de NDWI obtenidos en el mosaico húmedo. Un umbral ≥ 0.18 de NDWI mapea agua pero genera confusiones con sombras topográficas muy marcadas y con algunos tipos de suelo (XU, 2006).

Para separar agua de sombras se utilizó un modelo de pendiente obtenido a partir del SRTM 30. Para separar agua de algunos tipos de suelo se utilizó el MNDWI con un umbral ajustado siguiendo la misma pauta de generar iterativamente modelos a partir de umbrales. El agua, entonces, se define:

Agua = $\text{NDWI} \geq 0.18$ AND $\text{MNWI} \geq 0.54$ AND $\text{Pendiente} < 10^\circ$

El mapa resultante presentaba pocos errores de comisión que fueron limpiados manualmente a partir de interpretación visual en imágenes de alta resolución espacial. Comparando el resultado con mosaicos globales de alta resolución temporal también se verificó que algunas lagunas no habían sido mapeadas. Estas omisiones no atribuibles a la metodología si no al período de tiempo disponible de la escena Sentinel (2015-2018) se podría resolver repitiendo la misma metodología con la plataforma Landsat de las cuales se cuentan con más años de datos.

Finalmente ésta capa de cobertura de agua fue filtrada a partir de un índice de forma calculado como $\text{perímetro} / \text{área}$. A partir de un umbral de éste de 0.75 se pudo separar con una precisión de 78% los lagos y lagunas de otros cuerpos de agua (i.e. principalmente vegas inundadas)

La capa de hidrología se generó por procesamiento automatizado con la herramienta Hydrology de ArcGis 10.1 y en base a un DEM de 30 metros de resolución.

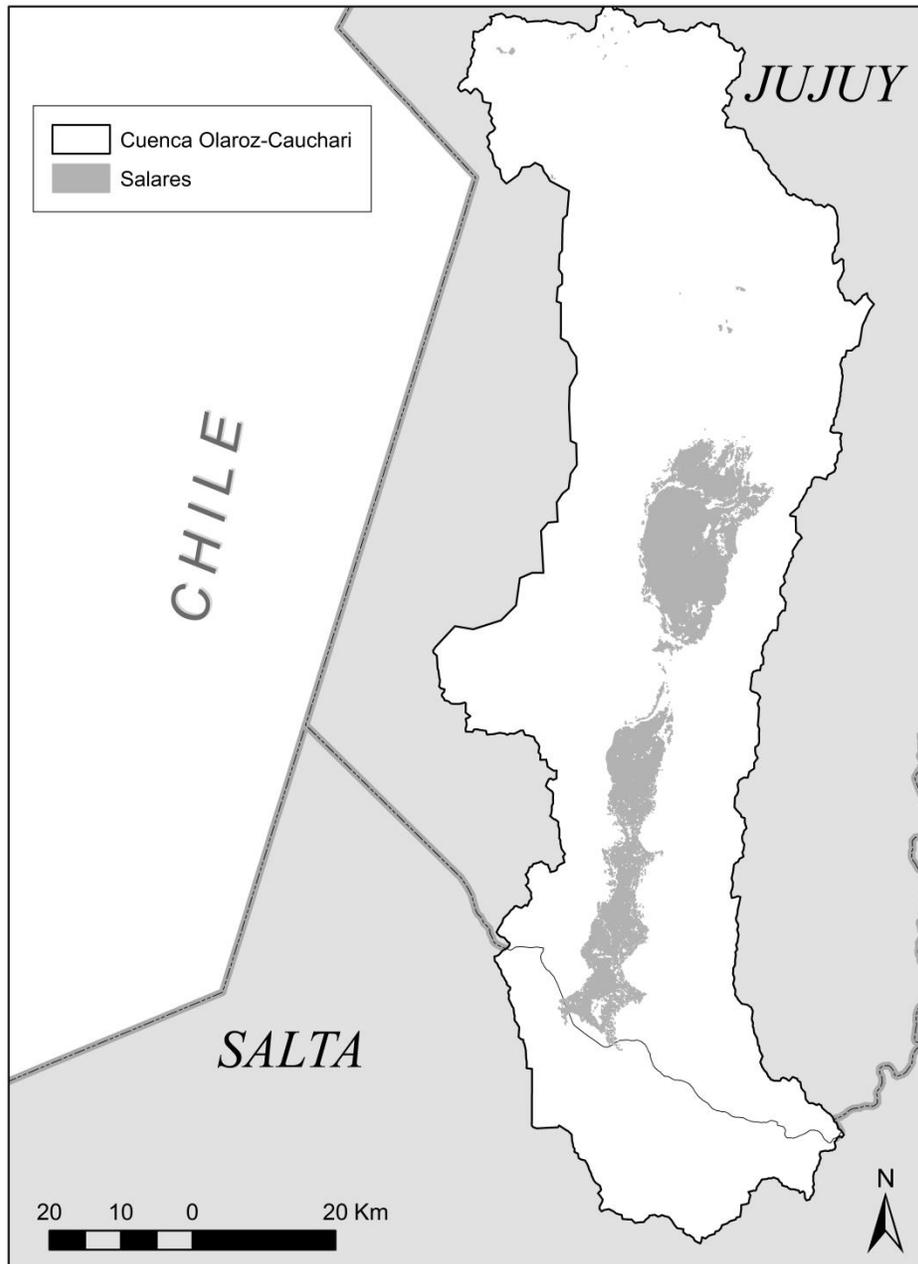
Resultados

Salares

La clasificación salar resultó en un área de 45.770,55 ha de cobertura de salar separado en dos núcleos de 26.010,86 al Norte conocido como Olaroz y 19.755,81 al Sur, Cauchari (Figura 5). Otros polígonos de menor tamaño suman 205,11 ha distribuidos principalmente en el extremo noroeste de la cuenca (Figura 5). Ambos núcleos ocupan una depresión orográfica N-S separada por el cono aluvial del río Archibarca el cual actúa como una barrera entre ambos (García 2015)

Cabe destacar que esta cobertura corresponde a la Clase Salar. La determinación de Tipos involucra relevamientos y análisis de campo que no se pudieron realizar por las limitaciones financieras y de tiempos del presente proyecto.

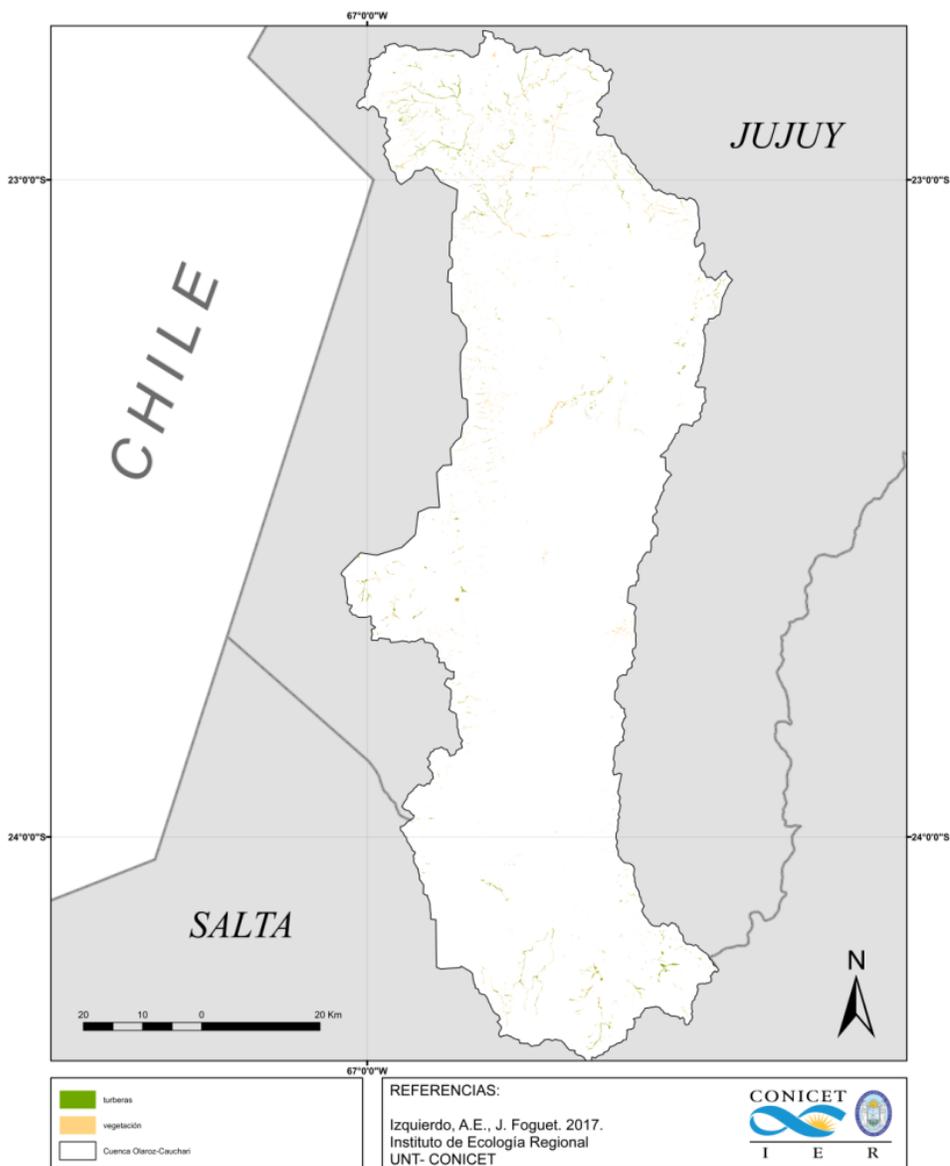
Figura 5: núcleos de salar clasificados en la Cuenca Olaroz-Cauchari



Vegas

La superficie total de turberas en el área de estudio es de 1875 ha (Figura 6) con un promedio de 0.2 ha y unidades que van de los 0.009 ha

Figura 6: turberas de la cuenca Olaroz-Cauchari con la distribución de la matriz vegetada asociada a estos humedales .



La metodología propuesta que incluyó la clasificación de la matriz vegetada de las turberas permite contextualizar la matriz circundante de la clase vegetación (Figura 6) que si bien no calificaría como humedal estaría fuertemente relacionada a la dinámica hídrica local y probablemente actúe como un ecotono con transiciones temporales entre clases.

Para explorar la clasificación en subtipos o unidades ecológicas de las vegas nos basamos en un set de datos propio de 50 vegas distribuidas en la puna de Argentina (13 en Salta, 29 en Catamarca, 5 en La Rioja y 3 en San Juan) durante los meses de diciembre a abril de los años 2013 a 2017. La vegetación de las vegas se relevó mediante un cuadrante de 1m², con 6 a 41 cuadrantes por vega, distribuidos semi al azar, tratando de captar la mayor riqueza de especies. Complementamos el muestreo con recorridos en las vegas para registrar las especies que no entraron en el cuadrante. Además de las coberturas de cada especie de planta vascular, registramos coberturas de hongos, algas y briofitos (englobándolos en una categoría de plantas no vasculares) también registramos coberturas de diferentes sustratos abióticos; suelo desnudo, suelo salino o costras de sal, agua, materia orgánica, heces y cuevas de roedores. , clasificamos las plantas vasculares en 12 formas de vida: cojines (duros, generalmente un solo individuo, y una sola raíz), tapetes (blandos, generalmente varios individuos enraizados), postradas, erectas, gramínoides cespitosos, gramínoides dispersos, gramíneas en penacho, rosetas, juncales, arbustos/subarbustos, acuáticas arraigadas y acuáticas flotantes. Exploramos la relación de composición florística entre las vegas, a través del índice de similitud de Bray Curtis (Legendre y Legendre, 1998), y posteriormente usamos un análisis de ordenamiento multidimensional no métrico (NMDS; Kruskal y Wish 1978), usando el programa PCORD 5.0 (McCune & Grace 1999). La matriz principal se basó en la cobertura de las plantas vasculares por vega (dato promedio de cuadrantes de 1m²; entre 6 y 41 cuadrantes por vega, obteniendo matriz primaria de 90 especies por 50 vegas (excluyendo especies solo registradas una vez). Usamos una matriz secundaria de 50 variables, incluyen 7 variables topográficas (largo, área, altura promedio y rango, pendiente promedio y rango, longitud, latitud) 11 variables del agua (temperatura, pH (y pH ml), conductividad, turbidez, oxígeno disuelto (en ml/l y %), sólidos totales, salinidad para explorar las asociaciones espaciales entre las vegas (Tabla 4) y variables biológicas (n° de especies, cobertura vegetal total, coberturas de sustratos, y cobertura de 12 formas de vidas). Para evaluar la significancia estadística de las especies en la segregación de las vegas en el ordenamiento hicimos correlaciones Kendal tau entre la cobertura de las especies y los valores de las vegas sobre los ejes (scores). Y entre los scores y las variables de la matriz secundaria (Tabla 4)

Tabla 4. Correlaciones Kendal tau entre los 2 ejes del NMDS y la matriz principal (especies por vega) y la matriz secundaria.

Especies	eje 1	eje 2
<i>Cortaderia speciosa</i>	-0.45	-0.192
<i>Distichlis humilis</i>	-0.431	-0.26
<i>Phylloscirpus acaulis</i>	-0.415	-0.216
<i>Hypochaeris chondrilloides</i>	-0.363	-0.469
<i>Cotula mexicana</i>	-0.352	0.072
<i>Acaena magellanica</i>	-0.345	-0.248
<i>Taraxacum officinale</i>	-0.344	-0.163
<i>Nitrophila australis var australis</i>	-0.334	-0.508
<i>Juncus balticus</i>	-0.331	-0.253
<i>Lobelia oligophylla</i>	-0.325	0.245
<i>Muhlenbergia asperifolia</i>	-0.323	-0.199
<i>Myriophyllum quitense</i>	-0.32	-0.139
<i>Sisyrinchium chilense</i>	-0.304	-0.017
<i>Schoenoplectus americanus</i>	-0.303	0.008
<i>Deyeuxia Hackelii</i>	0.311	0.151
<i>Festuca nardifolia</i>	0.338	0.261
<i>Werneria heteroloba</i>	0.366	0.057
<i>Distichia muscoides</i>	0.385	0.159
<i>Oychlöe andina</i>	0.648	0.124
<i>Amphiscirpus nevadensis</i>	-0.095	-0.401
<i>Eleocharis atacamensis</i>	-0.089	0.399
<i>Plantago tubulosa</i>	0.027	0.38
<i>Werneria pygmaea var. pygmaea</i>	0.249	0.347

variables	eje 1	eje 2
Num spp	-0.382	-0.18
Cobertura veget	0.319	0.221
FV tipo arbustos	-0.341	0.017
FV tipo Juncales	-0.302	-0.02
FV tipo cojines	0.442	0.062
Elevación prom	0.536	0.007
Pendiente prom	0.352	-0.026
Largo vega	-0.329	-0.045
pH prom	-0.108	-0.3

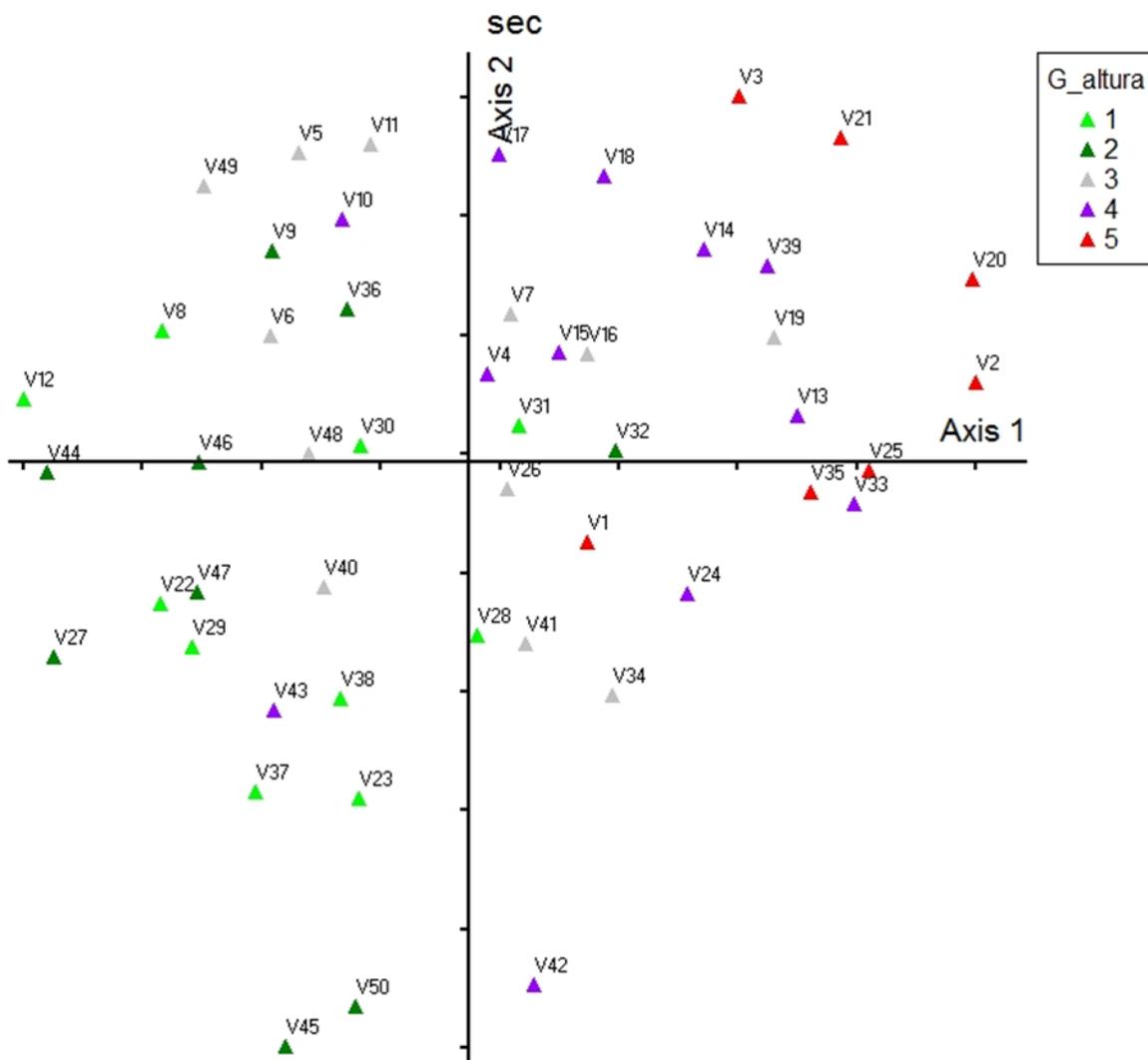
* se muestran especies y variables con coeficientes > 0.3, significativos $p < 0.05$. (No se muestran especies y variables con coeficiente < 0.3 significativamente asociados a los ejes).

En este análisis exploratorio de clasificación se registraron un total 81 géneros y 134 especies de plantas vasculares, correspondientes a 34 familias botánicas, en un gradiente de elevación de 3252 a 4768 msnm. Las formas de vida más abundantes fueron las plantas en cojín (33%), seguidas por Juncales (21%), gramínoles cespitosos (18%) y tapetes (17%).

Las 50 vegas convergen en 2 ejes; el eje 1 explicó el 40% de la varianza total, el eje 2, el 25%, siendo el total de la varianza explicada de 65% (Figura 7). 19 especies de correlacionan positivamente con el eje 1 (ej. *Oxicloe andina*, *Distichia muscoides*), 14 especies negativamente (ej. *Cortadera espicosa*, *Distichlis humilis*), tres especies positivamente con el eje 2 (ej. *Werneria pigmea*, *Eleocharis atacamensis*) y 3 negativamente (ej. *Nitrophylla australis*, *Hypochaeris condilioides*, *Amphiscirpus nevadensis*; Tabla 4).

Cuatro variables de la matriz secundaria se relacionan positivamente con el eje 1; altura, pendiente, cobertura vegetal total y formas de vida cojín. En el lado negativo del eje 1 se ubicaron las vegas con mayor número de especies, vegas más largas, con predominio de formas de vida arbustales y juncales. Con el eje 2, solo el pH se relaciona negativamente (Tabla 4).

Figura 7: Ordenamiento NMDS 2D. Colores de triángulos indican vegas con distintos rangos de altura; verde claro <3500m snm, verde oscuro 3500-3750m snm, gris: 3750-4000m snm, violeta: 4000-4250m snm, rojo >4250 m snm



De las 134 especies, 44 (32%) se registraron solo una vez (ej. *Aa paludosa*, *Aristida adscensionis*, *Astragalus tacorense*). En cambio, *Festuca argentinensis*, *Lobelia oligophylla*, *Triglochin concinna*,

Eleocharis pseudoalbibracteata, fueron las especies más ampliamente distribuidas (en 30 a 32 vegas; 60-64% de las vegas).

Estos resultados muestran que la elevación es una variable importante que determina las comunidades vegetales de las vegas y sus características relacionadas al tipo de sustrato; vegas más altas (vegas altoandinas) tienen mayor pendiente y un tipo de comunidad vegetal dominada por plantas en cojín (*Oxycloe andina*, *Distichia muscoides*), y presentan mayor cobertura vegetal, en relación a otras coberturas. Vegas más bajas (vegas puneñas) con menor pendiente, son más largas y son más ricas en número de especies, con comunidad vegetal dominada por juncales y arbustales. Adicionalmente, se puede observar que algunas especies vegetales se encuentran asociadas a suelos alcalinos (*Nitrophylla australis*, *Hypochoeris condilioides*, *Amphiscirpus nevadensis*).

En el caso de las vegas de la sub-cuenca Olaroz-Cauchari; las vegas mayormente pertenecen al rango altitudinal de las vegas altoandinas (Figura 8) y el relevamiento de vegetación de las vegas de esta sub-cuenca se corresponde a los tipos característicos de las vegas De cojín de este tipo de humedal (Tabla 1).

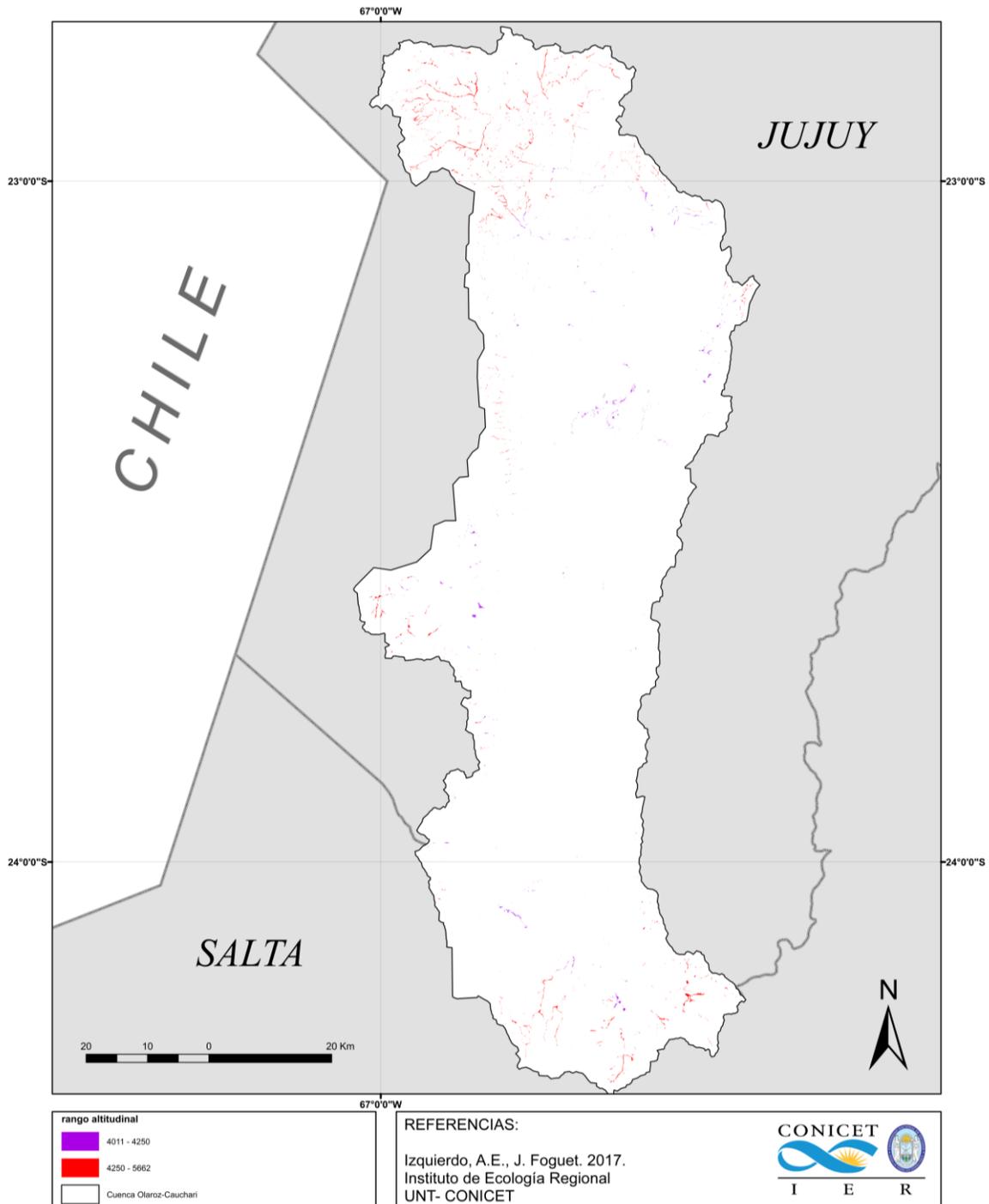


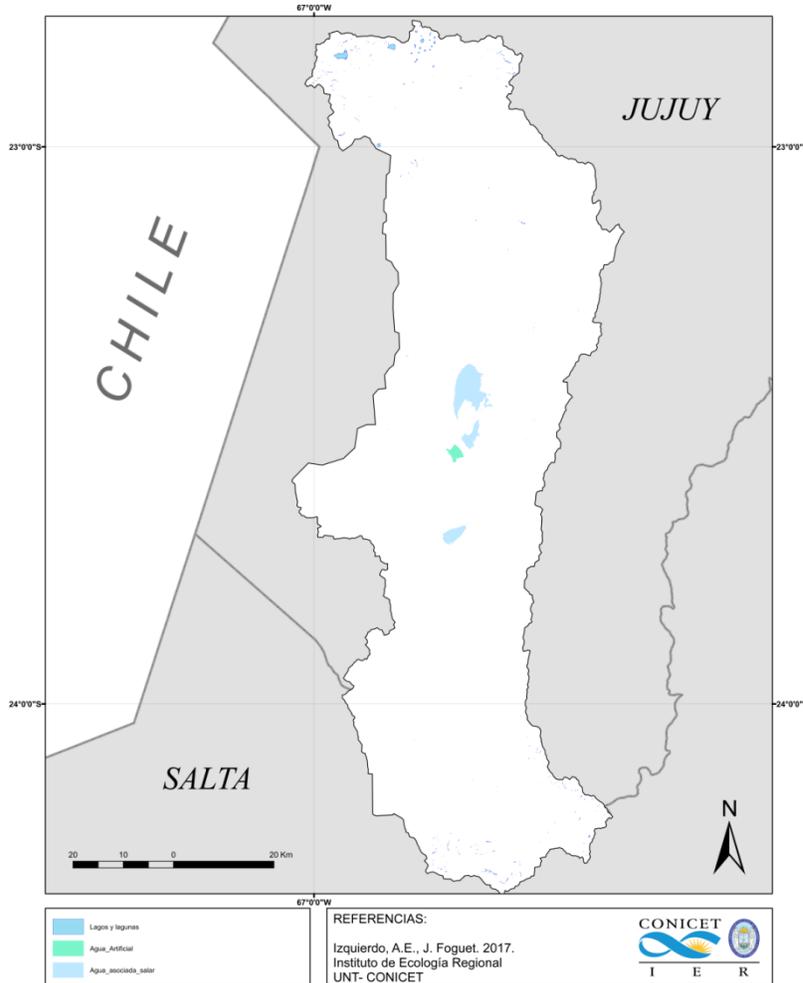
Figura 8: Tipos de vegas de la cuenca Olaroz-Cauchari.

Lagos y lagunas

La cobertura de lagos y lagunas alcanza los 517,48 ha en 33 unidades (Figura 9). El mapeo de agua también reportó 473.37 ha que corresponden a la clase de humedal Agua artificial (Figura 9) mientras que 5457.75 ha corresponden a agua asociada al salar (Figura 9). Esta última categoría no fue considerada como cobertura de lagos y lagunas dado su estacionalidad y cambio entre ésta y la clase salar.

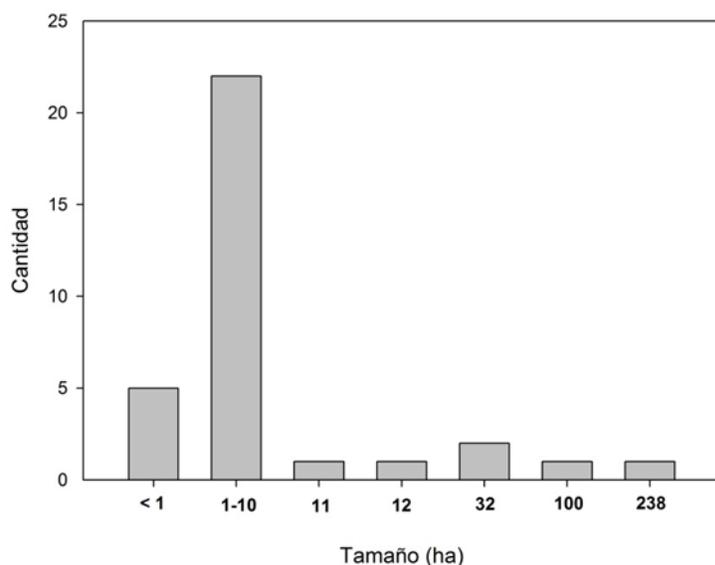
En general, las lagunas de la región son someras con pH alcalino, transparencia y heterogeneidad variable, con o sin hidrófitas. Otra característica ecológica de las lagunas de altura y que ha tomado mucha relevancia en los últimos años es la presencia de sistemas microbianos (Farias et al 2011, 2013). Los ecosistemas microbianos son únicos, no sólo por sus características geográficas y su variedad de ambientes extremos, sino también por su abundante biodiversidad microbiana. Los Ecosistemas Microbianos Andinos Asociados a Minerales (EMAM) son asociaciones de bacterias, Cianobacterias, Haloarqueas y Diatomeas que influyen o inducen la precipitación de minerales en lagunas, fuentes hidrotermales, fumarolas de volcanes y salares de la Puna. Incluyen tapetes microbianos, microbialitos (estromatolitos, trombolitos, oncolitos y leiolitos), biopelículas y endoevaporitas y se desarrollan asociados a humedales de la Puna. La importancia de los EMAM de la Puna se basa en que son los más altos descritos hasta el momento y debido a las condiciones extremas que da la altura (alta radiación UV, baja presión de O₂, cambios bruscos de temperatura, oligotrofia, etc.), éstos ecosistemas se desarrollan en el ambiente más parecido a la Tierra primitiva que se conoce en el planeta (Farias et al, 2011, 2013). La determinación de la presencia de EMAM en los humedales de la Puna toma por lo tanto cada vez más relevancia para el conocimiento científico y el manejo y preservación de los mismos.

Figura 9: Cobertura de agua en la cuenca Olaroz-Cauchari correspondiente agua artificial, asociada a salar y ojos de agua.



Las 33 unidades de lagos y lagunas mapeadas se distribuyen en 5 menores a 1 ha, 22 de entre 1 a 10 ha y 5 de más de 10 ha siendo la mayor de 238 ha (Figura 10)

Figura 10: distribución de tamaños de los lagos y lagunas de la cuenca de Olaroz



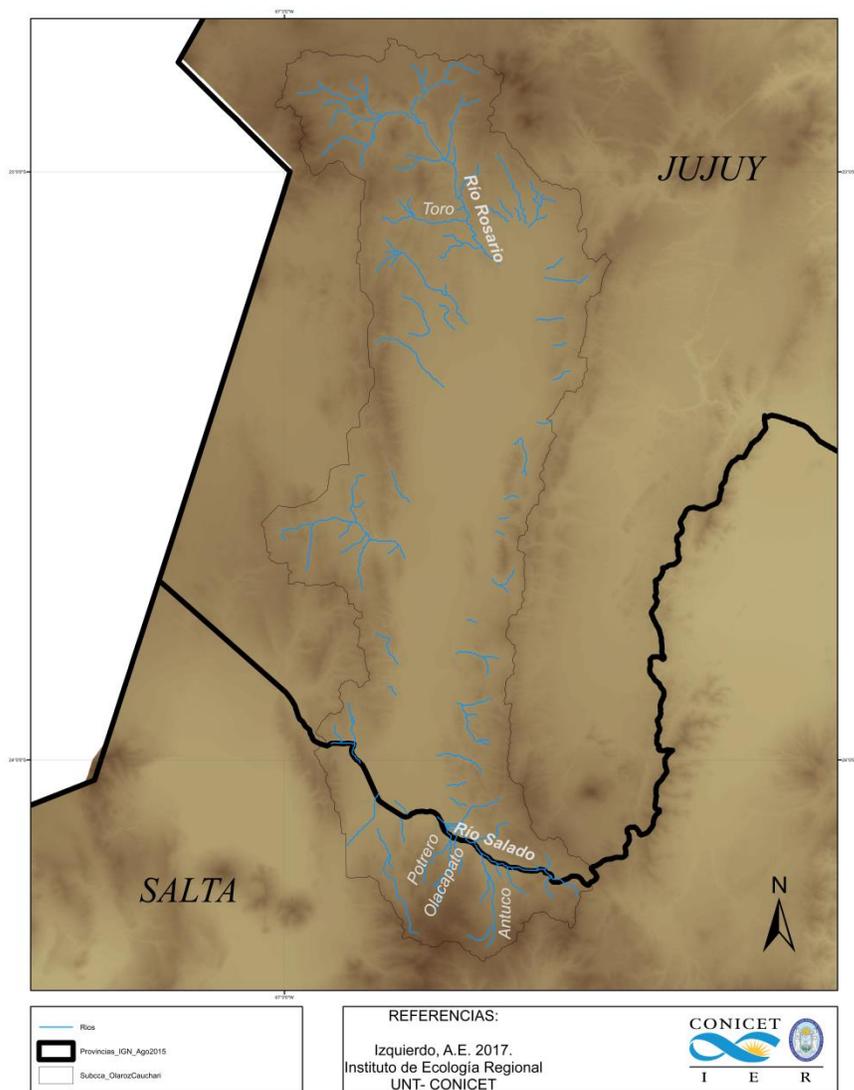
Ríos

En el ámbito de la ecología fluvial, los primeros intentos de clasificación de los ríos atienden a sus características biológicas, relativas a las especies piscícolas (Huet, 1954), a los grupos de invertebrados (Illies & Botosaneanu, 1963; Wright et al., 1989) o a las plantas acuáticas (Holmes, 1989), presentando en muchos casos una interpretación del funcionamiento del sistema fluvial (Cummins, 1974), y la relación entre las especies indicadoras utilizadas en la clasificación, y los factores físicos implícitos que determinan la zonación de los sucesivos hábitats fluviales (Hawkes, 1975).

La capa de hidrología generada en el presente piloto es a modo de referencia, pero el inventario de ríos necesitaría ser validado a través de mucho más trabajo de campo y análisis temporales

para evaluar los ciclos de cada curso de agua y sus características biológicas. La Figura 11 muestra la distribución de cursos de agua primarios y secundarios en la cuenca Olaroz-Cauchari.

Figura 11: red hidrológica de la sub-cuenca Olaroz-Cauchari



El único curso de escurrimiento permanente de la sub-cuenca es el río Salado o Tocomar, originado por los numerosos manantiales termales de Tocomar y Antuco (Paoli et al 2011). Sólo en la temporada estival el río descarga en el salar, a la vez que un conjunto de manantiales asoman en las inmediaciones. El río Tocomar o Salado circula por un valle muy amplio. Ello, unido al importante espesor de los depósitos aluviales, provoca que su recorrido no llegue más allá de Punta de Antuco, infiltrándose el total del caudal en el cauce. Los principales afluentes del río

Tocomar o Salado son los ríos Antuco, Olacapato y Potreros. De norte a sur otros cursos de menor importancia tales como el río Rosario y el arroyo Toro desaguan en la salina de Olaroz y Cauchari, y desde el sector oeste varios cauces de menor orden colectan agua de escurrimiento pluvial, desaguando en el salar de Cauchari y Salina de Jama (Paoli et al. 2003).

Las características ecológicas de los ríos de la Puna son aún poco conocidas. Las faunas de peces muestran considerables diferencias con los cambios de altitud, diferencias que en gran medida resultan de los cambios de temperatura correspondientes (Menni 2004). La mayoría de los peces del noroeste argentino viven en un promedio de temperaturas del agua variable de 18 a 22°C y pH cercanos a 7.

La trucha arco iris fue introducida en la Puna argentina a principios de la década del sesenta (Barros y Gonzo, 2004) y desde entonces constituye un recurso importante y es empleada como fuente de alimentación por los pobladores locales y es objeto de interés para la pesca deportiva. Sus efectos sobre las especies nativas no han sido profundamente evaluado en la región aún pero podría ser una variable de interés a la hora de caracterizar estos humedales (presencia o ausencia de esta especie introducida). La temperatura promedio óptima para el normal crecimiento de un salmónido introducido, la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) es de 15°C y para el desove de 10°C. Sin embargo, se han registrado ejemplares de truchas adultas, en el río Aguas Calientes que nace en manantiales termales vinculados con fallas en el volcán Galán. En esta área, a 4080 metros de elevación, el agua tiene una temperatura promedio de 23° C, rangos de pH entre 8-9 (que sería el límite superior del rango de tolerancia de pH de las truchas arco iris (Raleigh et al. 1984), con niveles de oxígeno disuelto que no superan los 9 mg/L y conductividad promedio de 1325 µS/cm.

Mediciones físico químicas de los diferentes cursos de agua son necesarios para la clasificación en tipos o unidades ecológicas de estos humedales.

Análisis de vulnerabilidad de turberas de la cuenca Olaroz-Cauchari

Los análisis de vulnerabilidad en base a caracterizaciones ambientales de las turberas de la Cuenca Olaroz-Cauchari muestran una relación significativa positiva entre el área de la vega y el NDVI promedio para la serie temporal considerada (Tabla 5); mientras la relación con el coeficiente de variación de ndvi es significativa con pendiente negativa (Tabla 5). Esto indicaría una mayor inestabilidad en la productividad de las vegas de menor tamaño, lo que incrementaría su vulnerabilidad a cambios hidrológicos por usos del suelo y/o cambio climático.

Otras relaciones significativas de interés para un análisis de vulnerabilidad de estos sistemas es la que se encuentra con la distancia a poblados que está relacionada positivamente al NDVI promedio y negativamente al coeficiente de variación de NDVI (Tabla 5). Mostrando en este caso la influencia que la actividad antrópica puede tener sobre estos sistemas altamente sensibles a cambios en su hidrología.

Tabla 5: Matriz de correlación (Sperman) de variables ambientales consideradas en el análisis de vulnerabilidad de vegas de la cuenca Olaroz-Cauchari.

Variables	NDVI	CV NDVI	FUEGO	CV FUEGO	ALTITUD	AREA	PREC MEDIA	PREC CV	INTRA 2004	INTRA 2010	DIST_POB	DIST_TOT
NDVI	1	-0.704	-0.201	0.009	0.004	0.337	-0.149	0.104	0.320	0.305	0.082	0.167
CV NDVI	-0.704	1	0.204	0.015	0.000	-0.538	-0.001	-0.004	-0.343	-0.298	-0.043	-0.205
FUEGO	-0.201	0.204	1	0.583	0.319	-0.232	0.067	-0.105	-0.080	-0.188	0.034	-0.135
CV FUEGO	0.009	0.015	0.583	1	0.392	-0.124	0.061	-0.092	0.194	0.069	0.189	-0.154
ALTITUD	0.004	0.000	0.319	0.392	1	-0.096	0.047	0.134	0.145	0.148	0.271	0.056
AREA	0.337	-0.538	-0.232	-0.124	-0.096	1	0.177	-0.084	0.202	0.282	-0.109	0.176
PREC MEDIA	-0.149	-0.001	0.067	0.061	0.047	0.177	1	-0.795	-0.040	0.062	-0.607	0.300
PREC CV	0.104	-0.004	-0.105	-0.092	0.134	-0.084	-0.795	1	0.001	-0.004	0.610	-0.163
INTRA 2004	0.320	-0.343	-0.080	0.194	0.145	0.202	-0.040	0.001	1	0.599	0.151	-0.006
INTRA 2010	0.305	-0.298	-0.188	0.069	0.148	0.282	0.062	-0.004	0.599	1	0.077	-0.049
DIST_CPG	0.082	-0.043	0.034	0.189	0.271	-0.109	-0.607	0.610	0.151	0.077	1	-0.220
DIST_TOT	0.167	-0.205	-0.135	-0.154	0.056	0.176	0.300	-0.163	-0.006	-0.049	-0.220	1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación alfa=0.05

CONICET



I E R

“2017-Año de las Energías Renovables”
INSTITUTO DE ECOLOGÍA REGIONAL
<http://www.ier.conicet.gob.ar/>

Bibliografía

- Barros, S. E., & de Gonzo, G. M. 2004. Poblaciones naturalizadas de truchas arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) en la Puna de Argentina: bases ecológicas para su manejo. In VI Congreso Internacional sobre manejo de la fauna silvestre en la Amazonia y Latinoamérica. Iquitos (Vol. 9, pp. 5-10).
- Chebez, J. C. 2005. Guía de las Reservas Naturales de Argentina: Noroeste. Ed. Albatros; Bs As Argentina.
- Cowardin, L. M., V. Carter, F. C. Golet and E. T. LaRoe (1979), *Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States, U.S.*, Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington, D.C.
- Cummins, K. W. 1974. Structure and function of stream ecosystems. *BioScience*, 24: 631-641
- Farias ME, Poire DG, Arrouy MJ, Albarracin VH (2011) Modern stromatolite ecosystems at alkaline and hypersaline high-altitude lakes in the Argentinean Puna. In: Tewari VC, Seckbach J, editors. *Stromatolites: interaction of microbes with sediments*. Springer Science+Business Media B. V. pp. 427–440.
- Farias, M. E., Rascovan N, Toneatti DM, Albarraci'n VH, Flores MR, et al. (2013) The Discovery of Stromatolites Developing at 3570 m above Sea Level in a High-Altitude Volcanic Lake Socompa, Argentinean Andes. *PLoS ONE* 8(1): e53497. doi:10.1371/journal.pone.0053497
- Finlayson, C. M., G. W. Begg, J. Howes, J. Davies, K. Tagi and J. Lowry (2002), *A Manual for an Inventory of Asian Wetlands*, Version 1.0, Wetlands International Global Series 10, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Garcia, M. G. The geochemistry of Li-rich brines in the northern Puna salars: possible sources and distribution patterns.
- Gopal, B. and M. Sah (1995), “Inventory and classification of wetlands in India”, *Vegetatio*, no. 118, pp. 39-48.
- Gu, D., Y. Zhang, J. fu and X. Zhang (2007), “The landscape pattern characteristics of coastal wetlands in Jiaozhou Bay under the impact of human activities”, *Environmental Monitoring and Assessment*, 124, pp. 361-370.

Hawkes, H. A. 1975. River zonation and classification. In: River Ecology. B. A. Whitton (ed.): 312-374. Blackwell, London, U.K.

Holmes, N. T. H. 1989. British rivers: A working classification. *British Wildlife*, 1: 20-36.

Izquierdo, A. E.; H. R. Grau; C. Navarro; E. Casagrande; C. Castilla, A. Grau. *en consideración*. Highlands in transition: urbanization, pastoralism, mining, tourism and wildlife in Argentine Puna region. Mountain Research and Development.

Izquierdo, Andrea E., J. Foguet, H.R. Grau. 2015. Mapping and spatial characterization of Argentine High Andean peatbogs. *Wetlands Ecology and Management* DOI 10.1007/s11273-015-9433-3.

Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Lourival, R., Wittmann, F., Kandus, P., Lacerda, L. D., ... & Agostino, A.A. 2014. Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 24(1), 5-22.

Menni, R. C. (2004). Peces y ambientes en la Argentina continental. Monografías del Museo Argentino de Ciencias Naturales.

Paoli H., Elena H., Mosciaro J., Ledesma F., Noé Y. 2011. Caracterización de las cuencas hídricas de las provincias de Salta y Jujuy. EEA Salta, INTA. Salta, Argentina.

Ramsar 1990. Ramsar Classification System for Wetland Type. Recommendation 4.7 and amended by Resolutions VI.5 and VII.11 of the Conference of the Contracting Parties 1990.

Reid Rata, Y.; Malizia, L.; Brown, A.; Buzza, K. *En prensa*. Áreas protegidas de la Puna. La protección de la biodiversidad en la Puna. *En*: Grau, H.R., Izquierdo, A.E., Babot, J. Grau. A (Eds). La Puna: Sociedad y Naturaleza. Fundación Miguel Lillo, S. M. de Tucumán, Argentina.

Semeniuk, C. A. and V. Semeniuk. 1995. “A geomorphic approach to global wetland classification”, *Vegetatio*, no. 118, pp. 103-124.