



**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIOS OCURRIDOS EN HUMEDALES  
UTILIZANDO IMAGENES SATELITALES  
PERIODO 1984 - 2011**

**Proyecto “Mantenimiento del Sistema de Información Territorial de Humedales  
Altoandinos SITHA”**

**Marion Espinosa. Ing. Agr. Ms. Ingeniería y Gestión Ambiental  
Lesly Orellana. Licenciada en Ciencias Ambientales, U. de  
Chile**

**Daniela Alegría. Licenciada en Geografía, U. Católica de  
Valparaíso**

**Gabriel Ortiz. Cartógrafo especialista SIG y Sensores Remotos**

**Diciembre - 2011**

# ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIOS OCURRIDOS EN HUMEDALES UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES

**PERIODO 1984 – 2011**

## **1. INTRODUCCIÓN**

Las vegas y bofedales altoandinos son ecosistemas caracterizados por una condición hídrica de saturación permanente, presentando una gran diversidad biológica respecto del entorno, con un mayor número de especies vegetales y de fauna, propias de estos ecosistemas, los cuales corresponden a zonas de forraje y abrevadero de valiosas especies amenazadas en su conservación (vicuña, guanaco, llama y alpaca entre otros). Estos ecosistemas tienen además, una importancia social cultural, ambiental y económica, ya que constituyen el sustento para las comunidades altiplánicas aymará, quechua y atacameña, pueblos originarios del norte grande de Chile, debido a que han proporcionado por miles de años agua y vegetación para sus animales, de los cuales constituyen su fuente nutricional. En la actualidad corresponden a ecosistemas únicos, los cuales deben ser estudiados en profundidad con el fin de reconocer la compleja interacción de sus componentes básicos como la tierra, el agua los animales y las plantas.

La importancia genérica de los humedales como ecosistemas de importancia internacional ha sido recogida desde hace mucho por la comunidad de naciones en lo que se denomina “Convención relativa a los Humedales de importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas” conocida como Convención de Ramsar, que fue firmada en la ciudad de Ramsar (Irán) el 2 de febrero de 1971 y entró en vigor en 1975. Chile adhirió a esta Convención, materia que fue aprobada como Ley de la República en septiembre de 1980 y promulgada como tal, a través del DS N° 771 de 1981, del Ministerio de Relaciones Exteriores.

Dentro del contexto de cambio climático actual y del creciente aumento de la población y sus necesidades (alimentación, ocio, abrigo, etc.), los humedales altoandinos se presentan como ecosistemas frágiles, dado que los recursos allí presentes (suelo, agua, flora, fauna) están expuestos a una serie de impactos ejercidos por el hombre, provocados por el mal manejo, conflictos de intereses y sobreexplotación de estos. Es debido a esta razón, que

surge la necesidad de estudiar la evolución de estos ecosistemas, dado que la información espacial presente es escasa, por tanto, la información obtenida a través de sensores remotos, se presenta como una alternativa que ayuda a evidenciar e identificar aquellas áreas vulnerables en base a la utilización de algoritmos pertinentes, para así generar información de base que esté disponible para hacer uso de los recursos de manera sustentable.

De esta forma, se llevó a cabo la selección de algoritmos adecuados para estudiar la dinámica de la cubierta superficial, específicamente vegetación y agua, utilizando datos satelitales y así, poder contar con información actualizada sobre los procesos de cambios de la cobertura vegetal y su relación con la evolución de la cobertura de agua, obteniendo datos reales de cuánto y donde han ocurrido los mayores cambios en el área de estudio.

## **2. METODOLOGÍA**

En términos generales, para el análisis multitemporal se utilizaron las imágenes ASTER de dos periodos. El primero, correspondiente al más actual, años 2008-2009 y el periodo anterior con el cual se analizaron los cambios, fueron del periodo 2000-2003.

En términos metodológicos, el primer paso fue dividir los mosaicos de ambos periodos en subescenas que representaran mejor un conjunto de humedales de la resolución, de esta forma, el área quedó distribuida en 27 subescenas donde se localizan los 264 humedales incluidos en el área de estudio.

Para realizar el análisis entre ambas imágenes, se revisó primeramente el calce espacial entre ellas, la distribución del histograma para cada banda y comparación visual de los tonos para definir una homogenización de las imágenes, que se hace necesaria debido a las diferentes condiciones de toma y fecha de estas.

La homogenización de las imágenes se realizó tomando muestras aleatorias de tonos claros como oscuros las cuales servirán para obtener el sesgo y la ganancia que corregirán y disminuirán las diferencias radiométricas entre estas y poder efectuar análisis comparativos, tomando como referencia la imagen correspondiente al periodo 2010.

Primero se realizó un análisis de “Detección de Cambios” con el algoritmo del software Erdas, el cual crea una imagen de diferencia para cada una de las bandas de la imagen en el periodo de análisis, además de crear una imagen destacando en distintos colores los cambios ocurridos en términos porcentuales de disminución o aumento. Los resultados obtenidos no pudieron ser interpretados en términos de cambios ocurridos en torno a las vegas y bofedales por representar, en términos porcentuales respecto del total de la subescena probablemente a que los cambios ocurridos por lo cual se optó por realizar un análisis de cambio entre índices vegetacionales Normalize Vegetation Index NDVI.

Para el cálculo del índice NDVI se utiliza la fórmula tradicional que contiene el software Erdas en donde utiliza la banda del infrarrojo y del rojo, y se calcula para cada imagen y tomando la imagen con la corrección radiométrica para el periodo del 2000 respecto del 2010, como se muestran en la figuras 1 y 2, respectivamente.

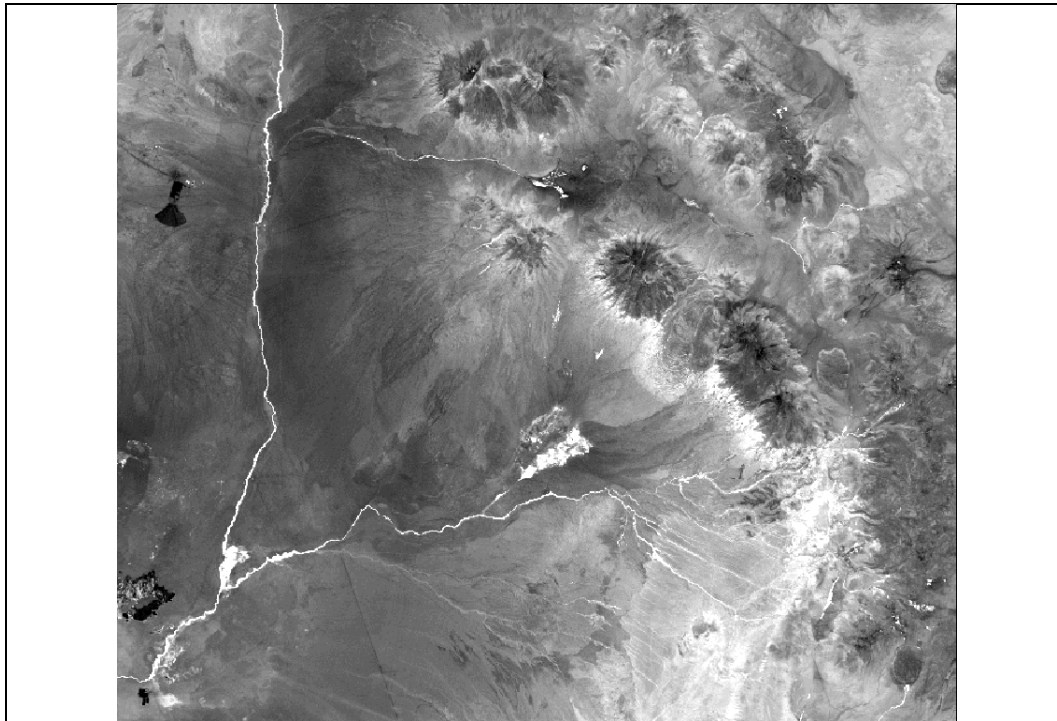


Figura 1. NDVI Aster 2010

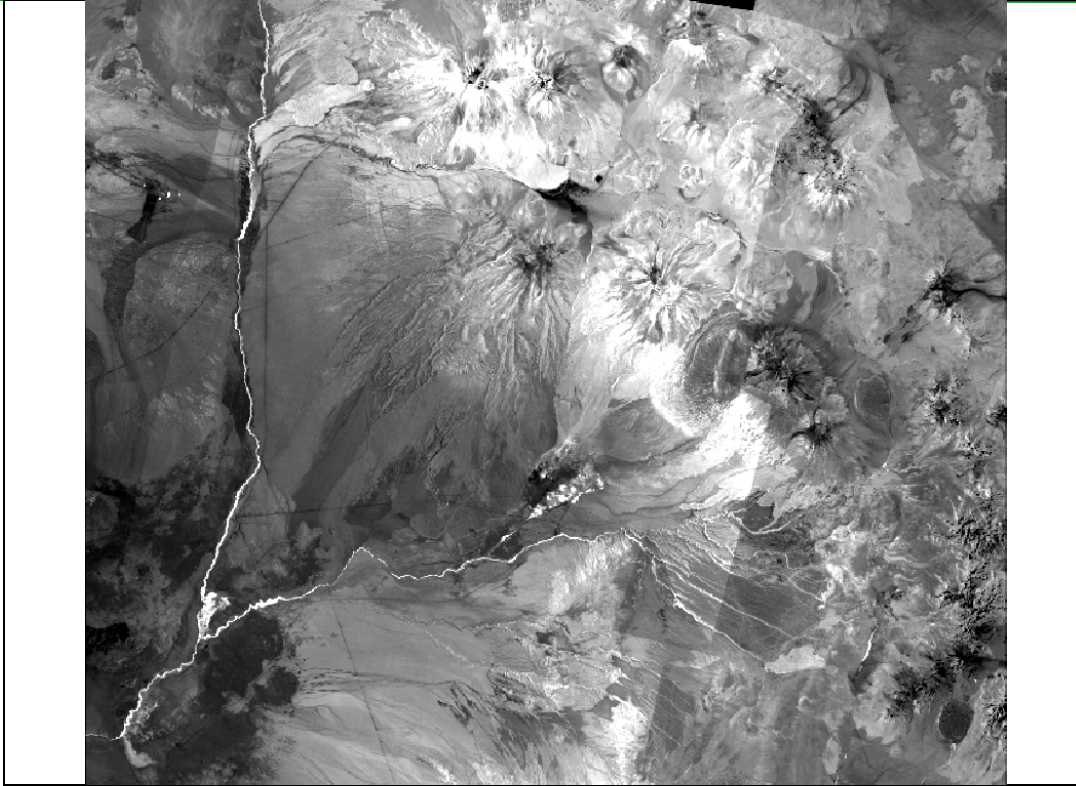


Figura 2. NDVI Aster 2000

Posteriormente se aplica el análisis de diferencia de índices vegetacionales de cambio NDVIC, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\text{NDVIC} = \left( \frac{\text{NDVI}(\text{año } n+1) - \text{NDVI}(\text{año } n)}{\text{NDVI}(\text{año } n+1) + \text{NDVI}(\text{año } n)} + 1 \right) * 100$$

Donde:  
 n= año anterior  
 n+1= año actual

Con este análisis se determina los aumentos o disminución de la cantidad de vegetación que se presenta entre el periodo de análisis, como se muestra en la figura 3.





Figura 3. Imagen de cambio

La imagen de cambios resultante entrega valores entre 0 y 200, donde los valores alrededor de 100 determinan los sectores sin cambios, los menores a 80 menor presencia en la temporada 2010 y los valores mayores a 110 corresponden a los mayores cambios respecto de la imagen del 2000.

A modo de ejemplo se muestra en la figura 4 un sector que está cerca de Chiu Chiu, que en diferentes colores muestra algunos de los resultados de cambio o pérdida de vigor vegetacional; en color naranja los sectores que se mantienen o sin cambio en el periodo; en color azul sectores que no existían en el año 2000 y los que han sufrido pérdida de vigor vegetacional en color verde.

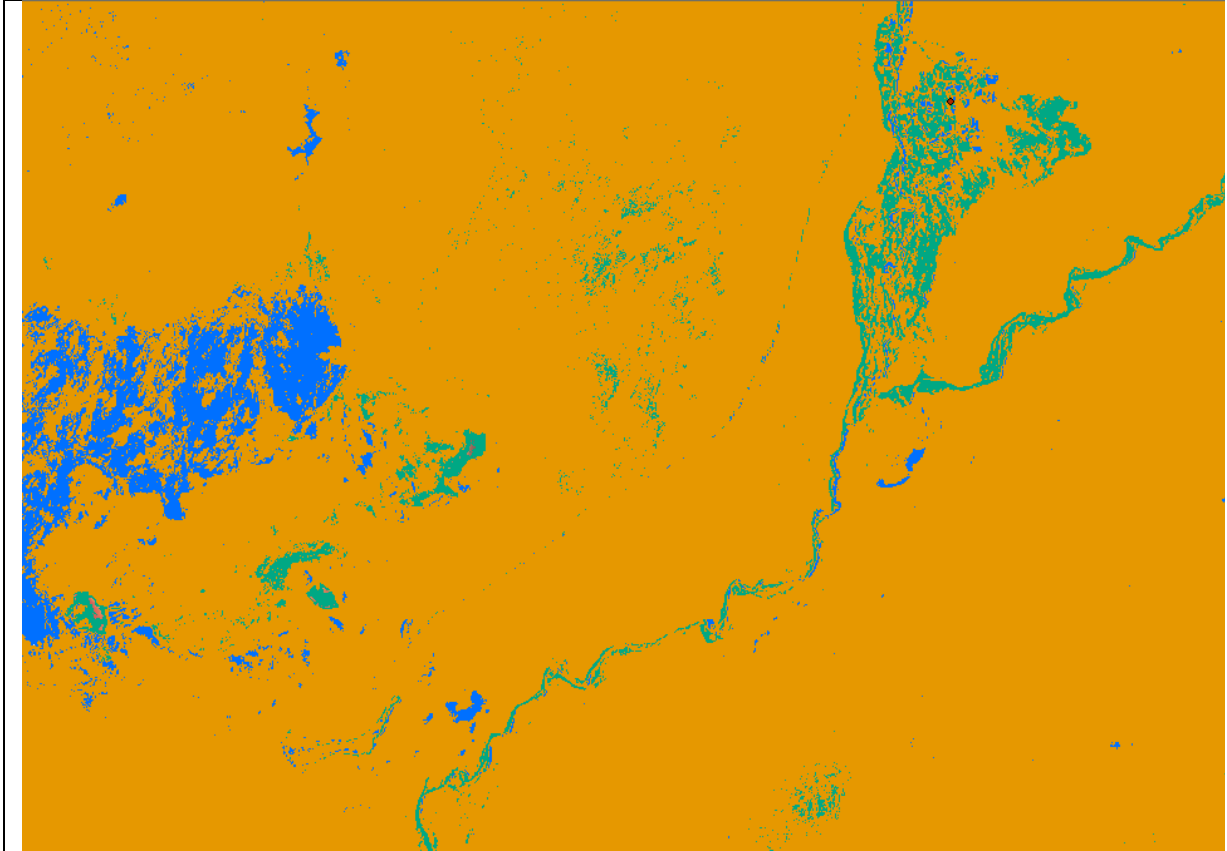


Figura 4. Agrupación de valores de la imagen de cambio

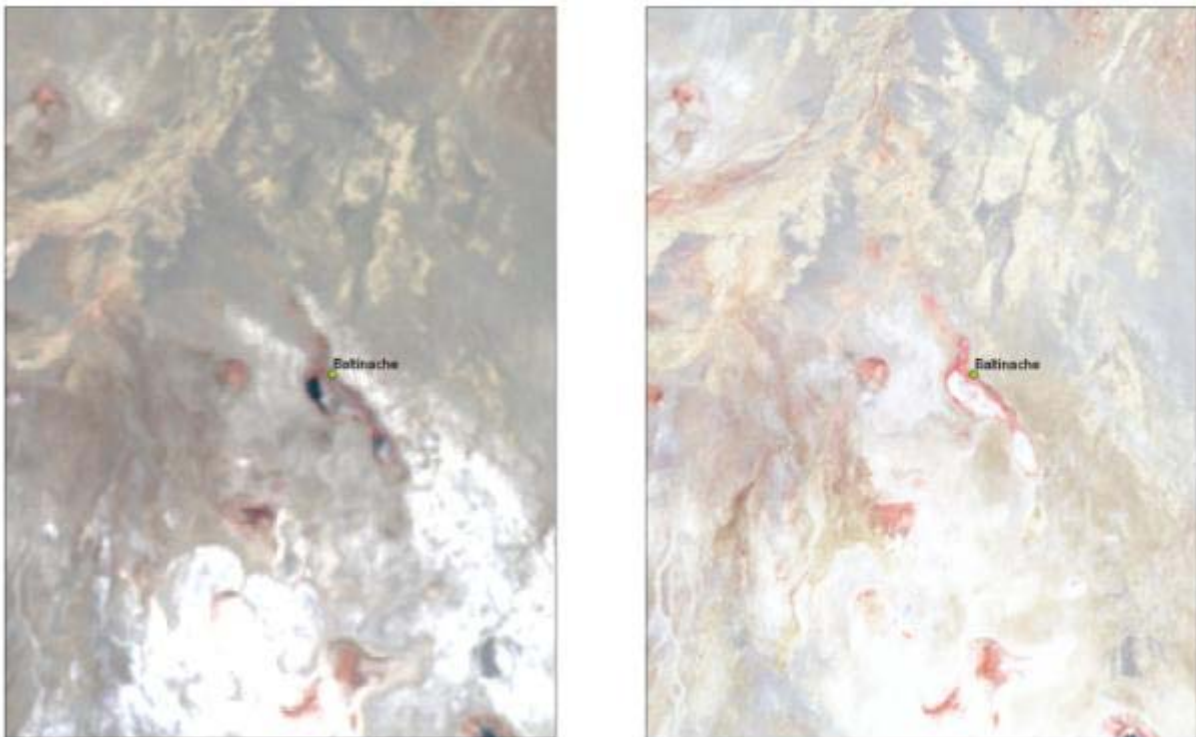
### 3. ANÁLISIS TEMPORAL PARA LOS HUMEDALES PRESENTES DENTRO DE LOS ACUÍFEROS PROTEGIDOS POR LA RES 529 DE 2003 DE LA DGA.

#### Baltinache

La Vega de Baltinache se observa en dos imágenes, la primera corresponde al año 1989 y la de la izquierda al mosaico Aster del 2010 (Imagen 1). Las bandas de la imagen Landsat se combinaron de la forma 4-3-2 para observar en color rojo la vegetación. Según lo observado el agua presente en la imagen del 2010 está congelada con respecto a la anterior, además se observa más vegetación. Esto puede deberse a la calidad de las imágenes que se están usando, ya que la imagen Aster tiene 15 mt de resolución, en cambio la Landsat 30 mt.

El tipo de amenaza Global que presenta esta vega es Muy Alta, y esto se debe principalmente al factor extracción de agua y la presión que ejerce el turismo. La condición no se determinó ya que no fue visitada en terreno.

Esta vega pertenece al acuífero protegido que contiene 5 derechos de agua subterráneos y uno de agua superficial, sin embargo fuera del acuífero protegido hay bastantes pozos que podrían estar afectando el curso normal de las aguas.



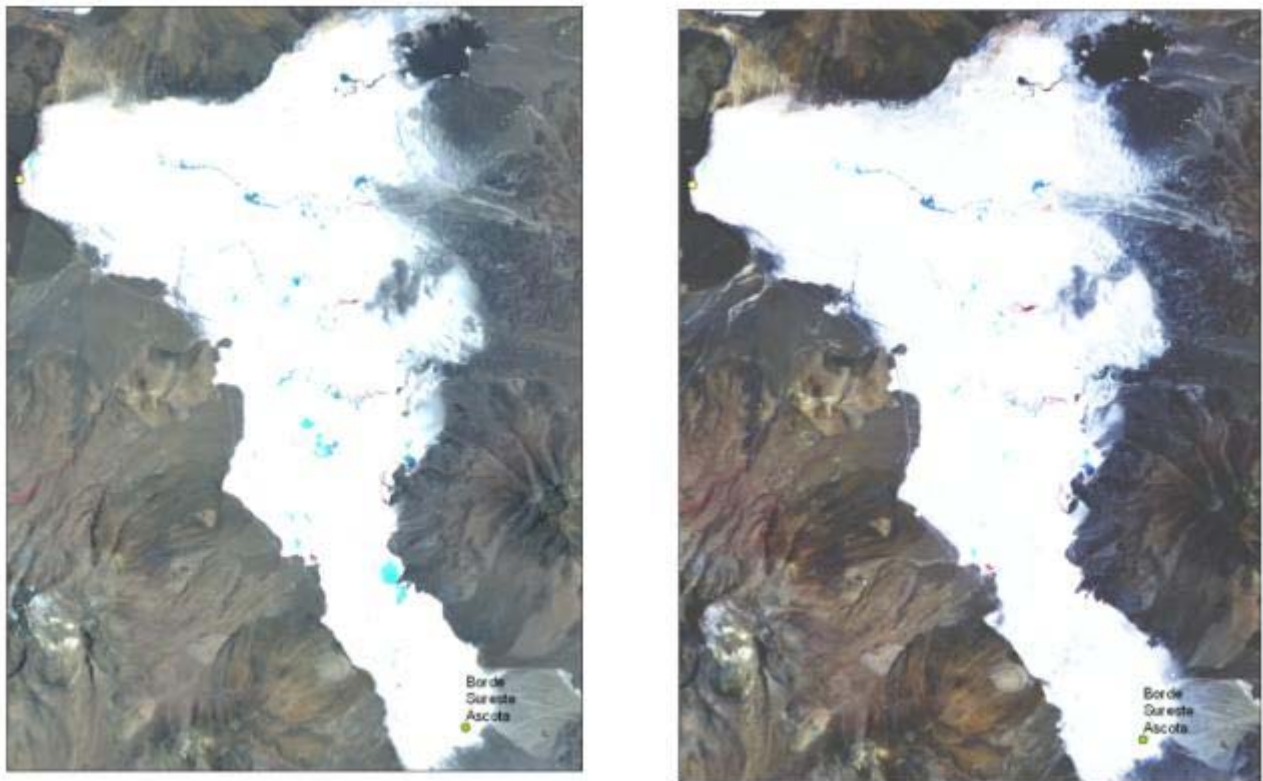
**Imagen 1.** Comparación de imágenes de la vega de Baltinache. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1989 y la imagen de la derecha al 2010.



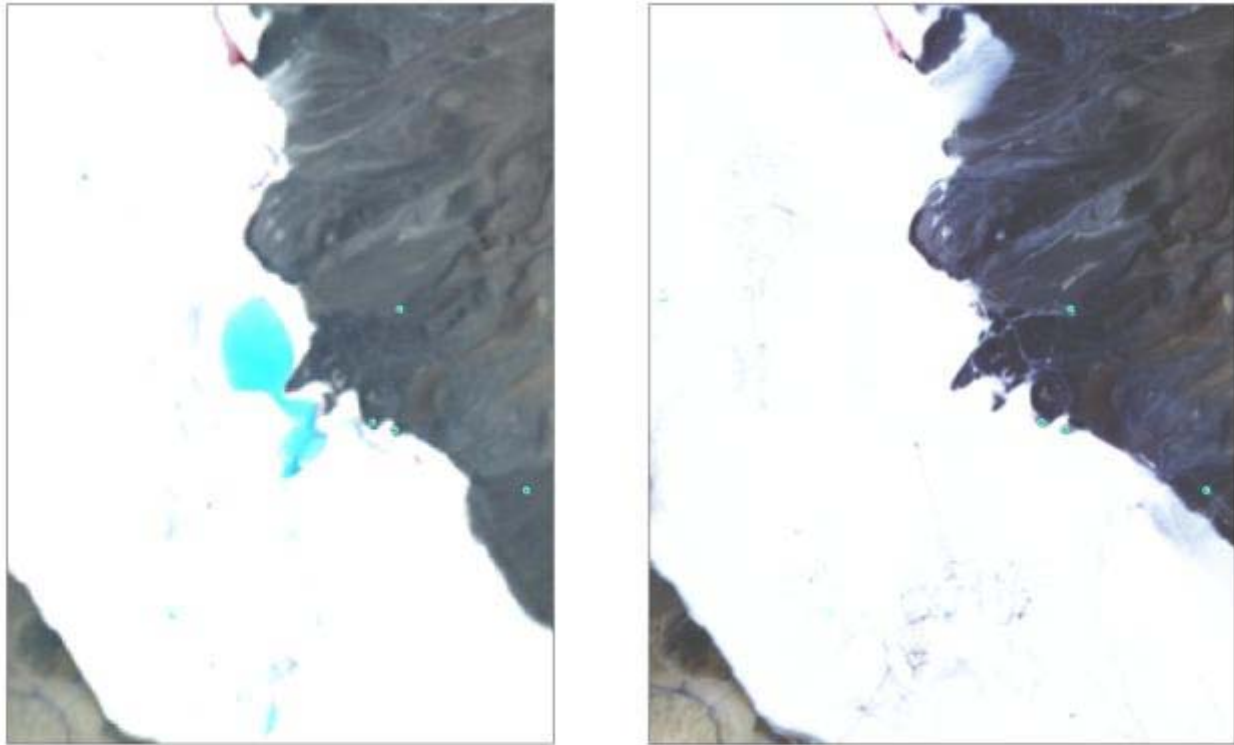
### **Borde Sureste Ascotán.**

En el mismo sitio de la vega Borde Sureste de Ascotán no se aprecia mucha variedad de vegetación o diferencias en cuerpos de agua, en cambio al mirar hacia el centro del salar se observa que en varios puntos hay diferencias notables de los cuerpos de agua, las razones pueden deberse a la pérdida de agua o que está congelada. La condición de la vega al ser visitada, fue Mala, pues estaba casi completamente seca. Además su amenaza global es Muy Alta, por extracción de Agua y por presión por turismo.

En el lugar hay tres pozos de muestreo y estación meteorológica Ascotán, los cuales se muestran en la Imagen 2. Sin embargo fuera del acuífero existen muchos otros pozos.



**Imagen 2.** Comparación de imágenes de la vega Borde Sureste de Ascotán. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1987 y la imagen de la derecha al 2010.



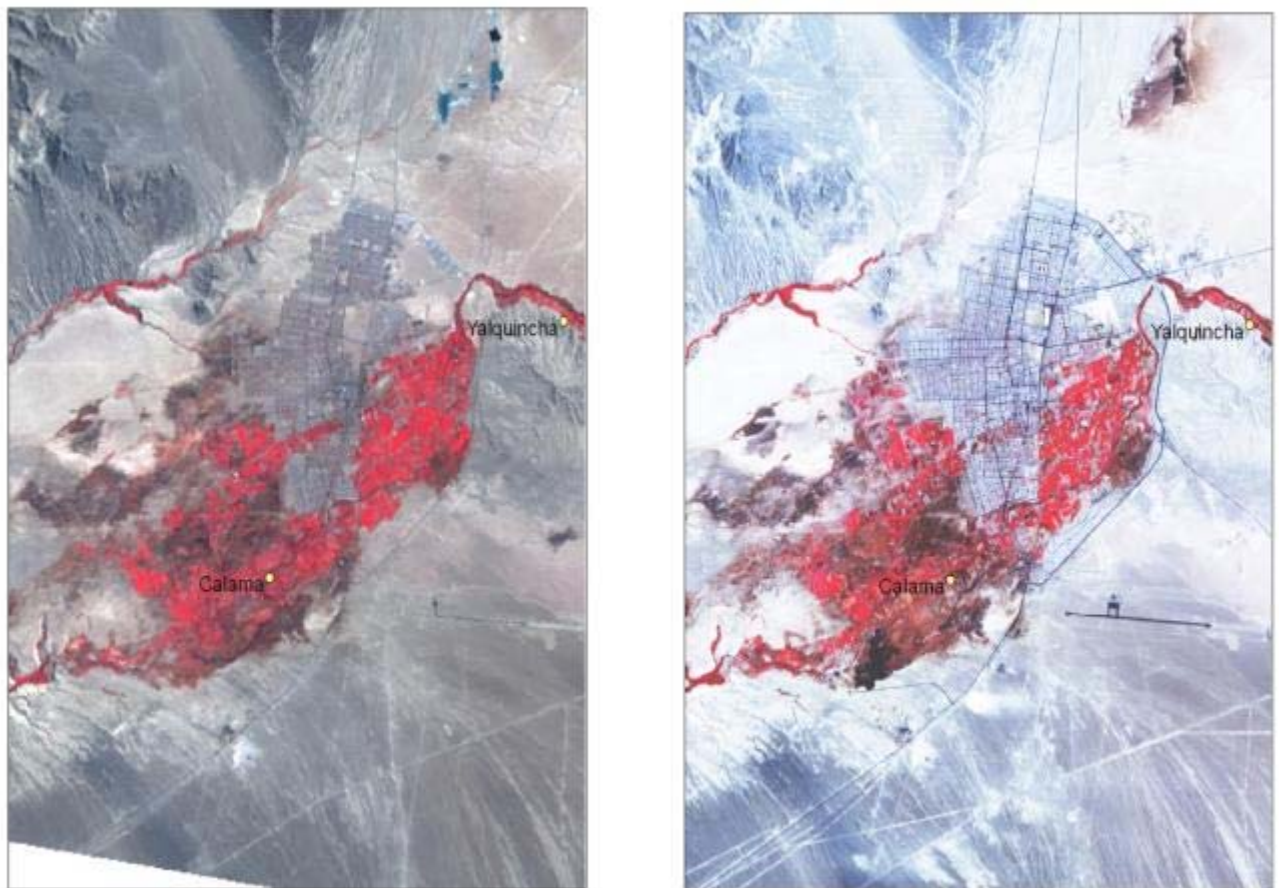
**Imagen 3.** Pérdida de Agua en vega Borde Sureste de Ascotán. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1987 y se observa claramente la laguna presente en el salar, en cambio en la imagen de la derecha no hay ningún cuerpo de agua. En celeste se muestran los derechos de agua subterráneos en el sector, razón por la cual, quizás desapareció el cuerpo de agua.

## Calama

Al comparar las imágenes en la Vega de Calama se identifica claramente el aumento de los cultivos, además de la pérdida de vegetación. En la parte superior derecha de la imagen se observa que los cursos de aguas presentes en la imagen de 1990 no están en el año 2010.

La amenaza Global identificada para Calama es Alta y se debe principalmente a la presión por extracción de agua y por turismo.

Dentro del acuífero protegido que contiene a la Vega de Calama, existen 8 pozos de extracción de agua subterráneos.



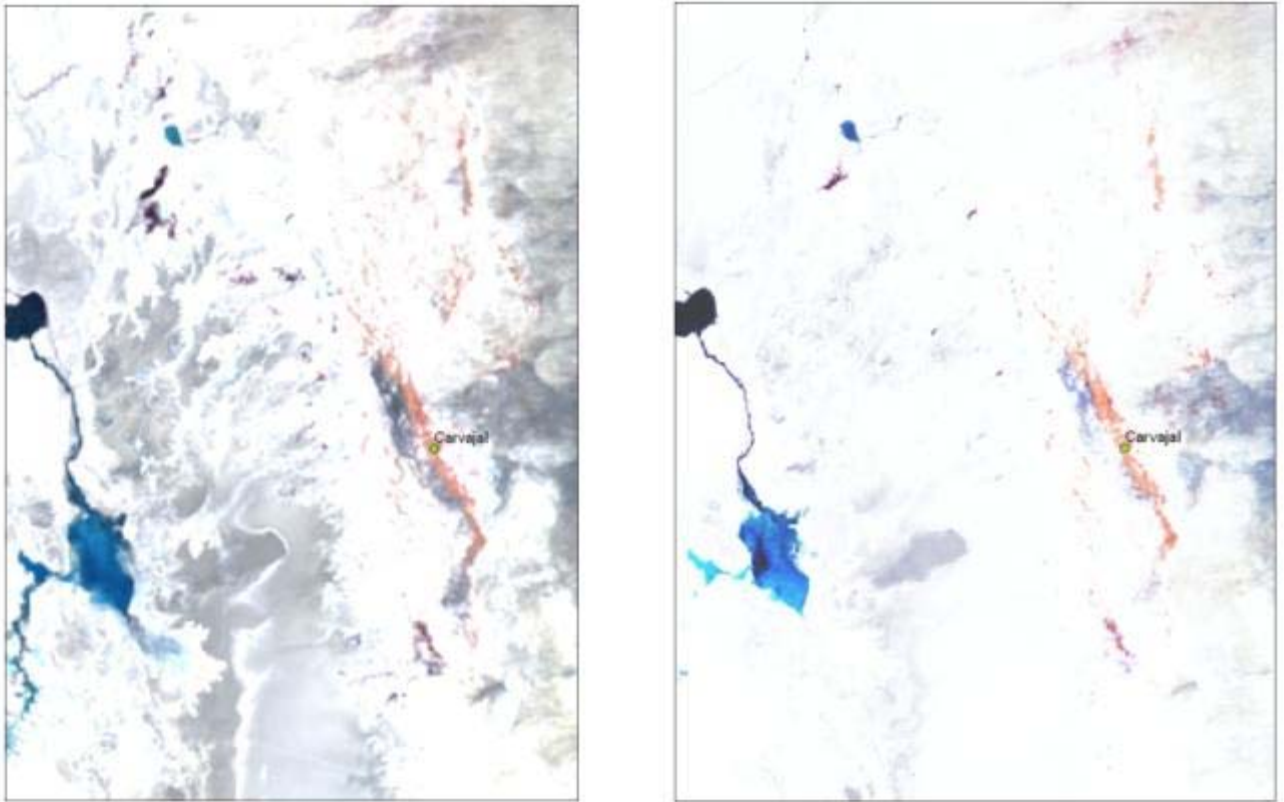
**Imagen 4.** Comparación de imágenes de la vega Calama. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1990 y la imagen de la derecha al 2010.

## Carvajal

En la comparación de imágenes para el bofedal de Carvajal se observan zonas con pérdida de vegetación. Esto puede ser efectivamente así o puede deberse a que la imagen Aster 2010 tenga una respuesta espectral sobresaturada.

La amenaza del bofedal es Muy Alta y se debe principalmente a la extracción por Turismo y por Extracción de Agua.

Dentro del acuífero protegido encontramos 5 pozos de agua subterránea y uno superficial. Alrededor del límite que protege el acuífero, existen muchos derechos de aguas, tanto superficiales como subterráneas que pueden estar afectando los cursos de agua del sistema.



**Imagen 5.** Comparación de imágenes del bofedal Carvajal. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1989 y la imagen de la derecha al 2010.

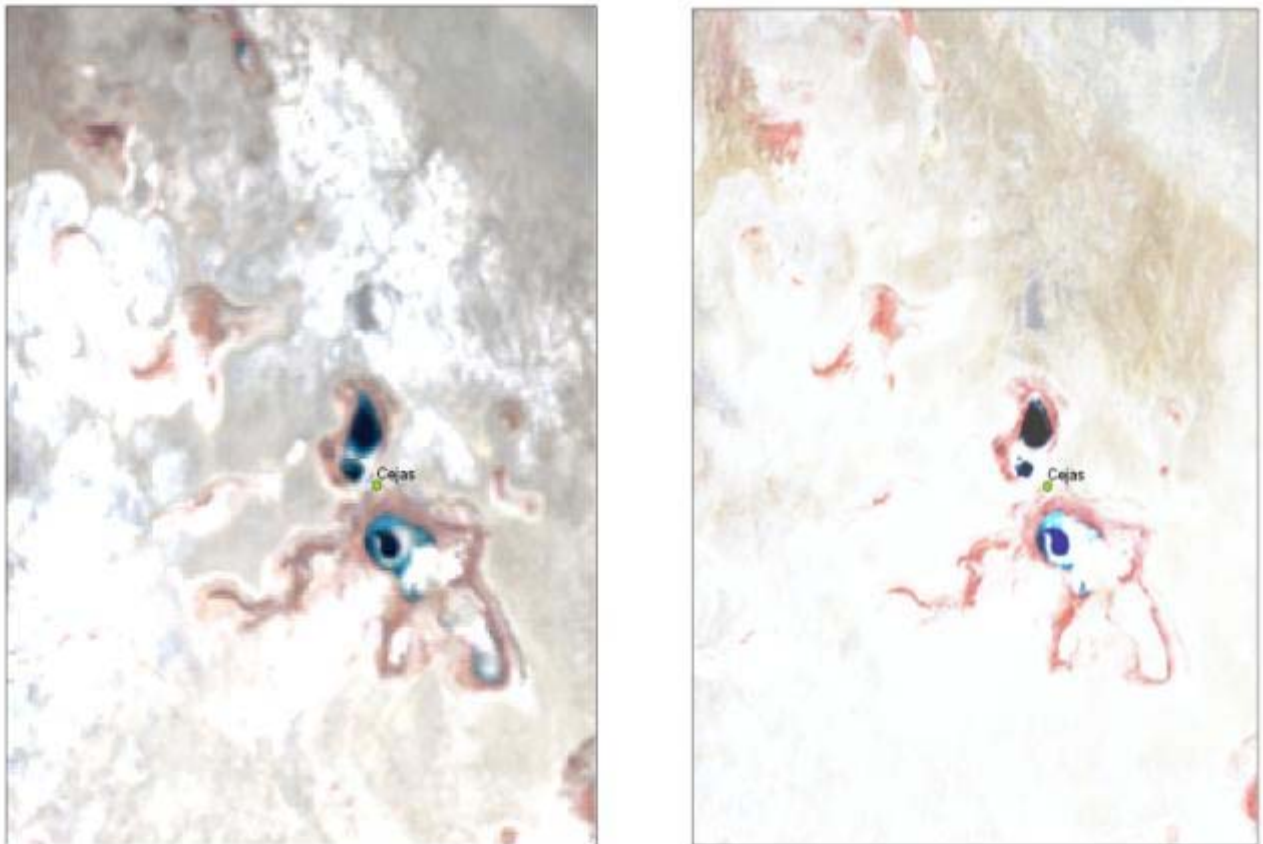


## Cejas

En la vega Cejas se observa que en la imagen de 1989 hay más vegetación aledaña a las dos lagunas del sistema. Para los cursos de agua la diferencia vista entre las imágenes puede deberse a que la imagen del 2010 está sobresaturada o a que el agua presente estaba congelada, sin que haya realmente una pérdida del recurso.

La amenaza de ésta vega es muy alta y se debe principalmente a la extracción de agua y la presión por turismo.

El acuífero protegido que contiene a la vega tiene 5 pozos de aguas subterráneas y uno de agua superficial.



**Imagen 6.** Comparación de imágenes de la vega Cejas. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1989 y la imagen de la derecha al 2010.



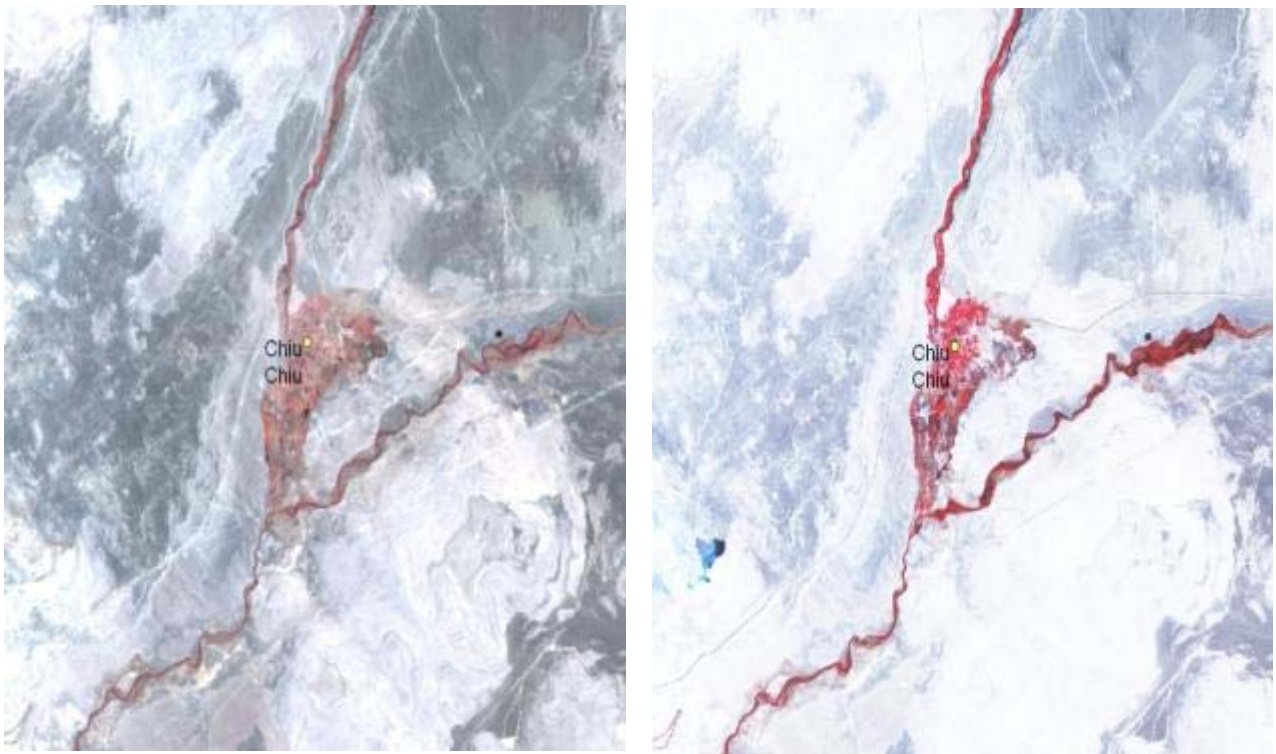
## Chiu Chiu

La vega de Chiu Chiu en el año 1989 presenta bastante vegetación, sin embargo en el año 2010 muchas de estas zonas tienen cultivos, por lo que hay un cambio en el uso del suelo.

Al ser visitada, la condición que se le asignó fue de Regular por las características que presentó en cuanto a la vegetación y presencia de agua.

La Amenaza global es alta y se debe a la presión por turismo y a la extracción de agua principalmente.

Dentro del acuífero al que pertenece Chiu Chiu encontramos 3 pozos de aguas subterráneas y al menos 20 de agua superficial.



**Imagen 7:** Comparación de imágenes de la vega de Baltinache. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1989 y la imagen de la derecha al 2010.

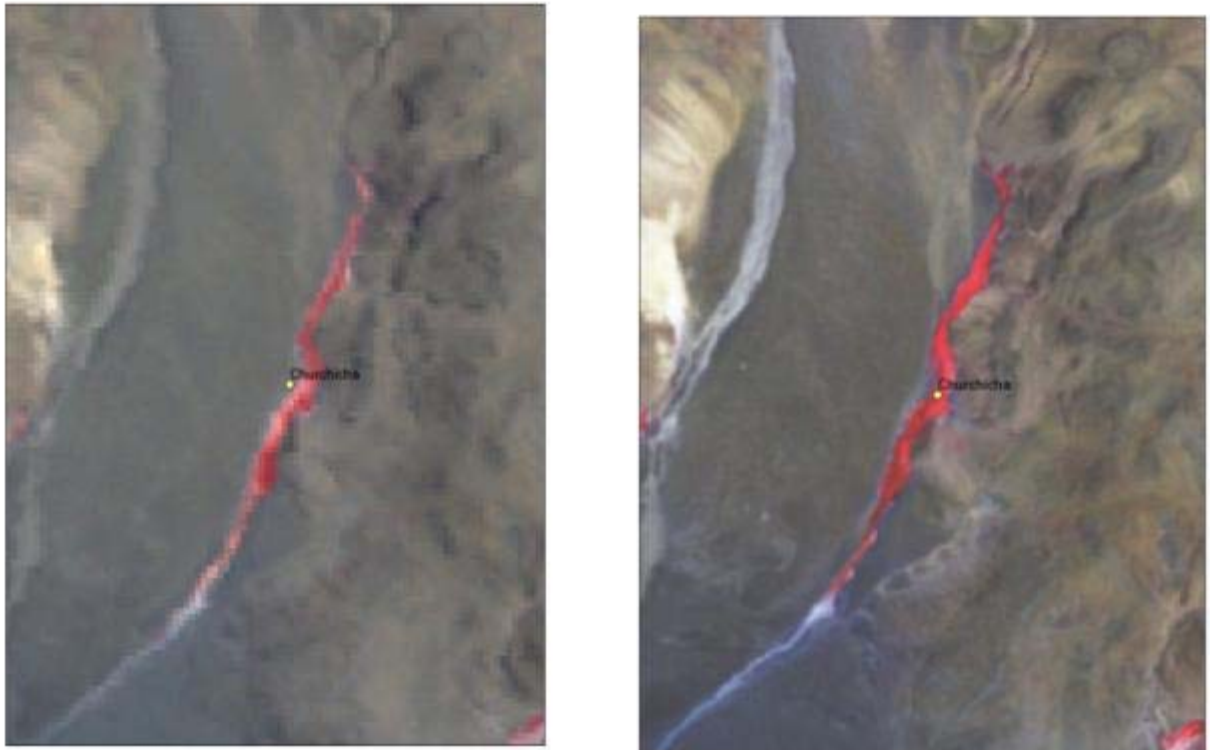
## Churchicha

En el bofedal de Churchicha no se observan diferencias al comparar ambas imágenes. Si debemos señalar que es más notoria la vegetación en la imagen Aster 2010, pero se debe a la calidad que posee en comparación a la imagen Landsat.

Su amenaza global es alta siendo las tres actividades, presión por turismo, extracción de agua, y presión por actividades silvoagropecuarias, ponderadas de igual forma.

Churchincha no fue visitada en terreno por lo que no se identificó su condición.

Dentro del acuífero protegido encontramos dos pozos de aguas subterráneas y uno de aguas superficial



**Imagen 8:** Comparación de imágenes del bofedal de Churchicha. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1990 y la imagen de la derecha al 2010.

## Guallatani

El bofedal de Guallatani no presenta cambios notables en la vegetación, la diferencia puede deberse a la calidad de la imagen Aster principalmente.

En la zona hay intervención humana, ya que se encontró un pozo profundo, correspondiente a un derecho de agua subterráneo otorgado en 1984, esto representa una amenaza, la cual está considerada dentro de la amenaza global con una ponderación de 8, sin embargo lo que más pondero al calcular este índice fue la presión por actividad silvoagropecuaria.

Dentro del acuífero protegido encontramos dos pozos de aguas subterráneas y uno de aguas superficiales

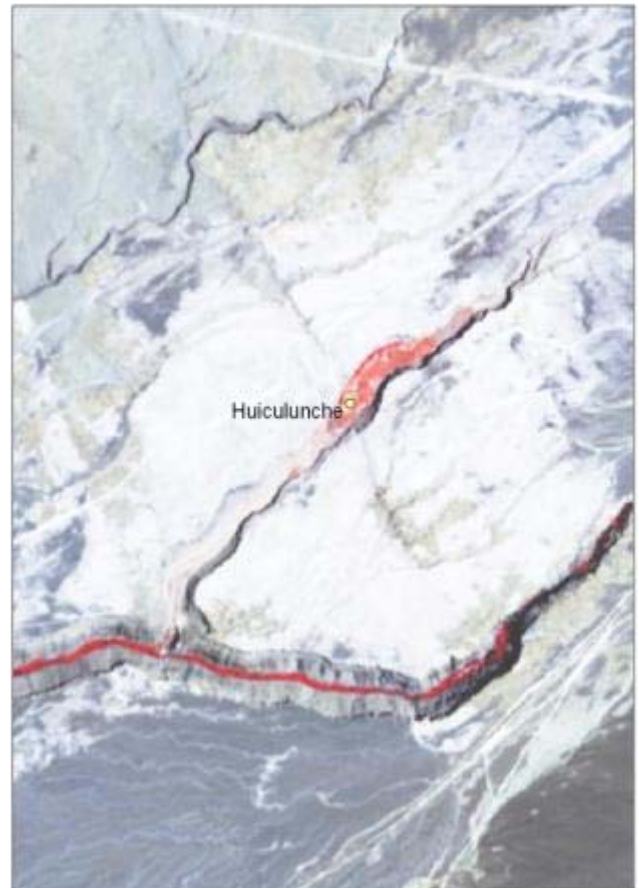


**Imagen 9:** Comparación de imágenes de la vega de Baltinache. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1990 y la imagen de la derecha al 2010.

## Huiculunche

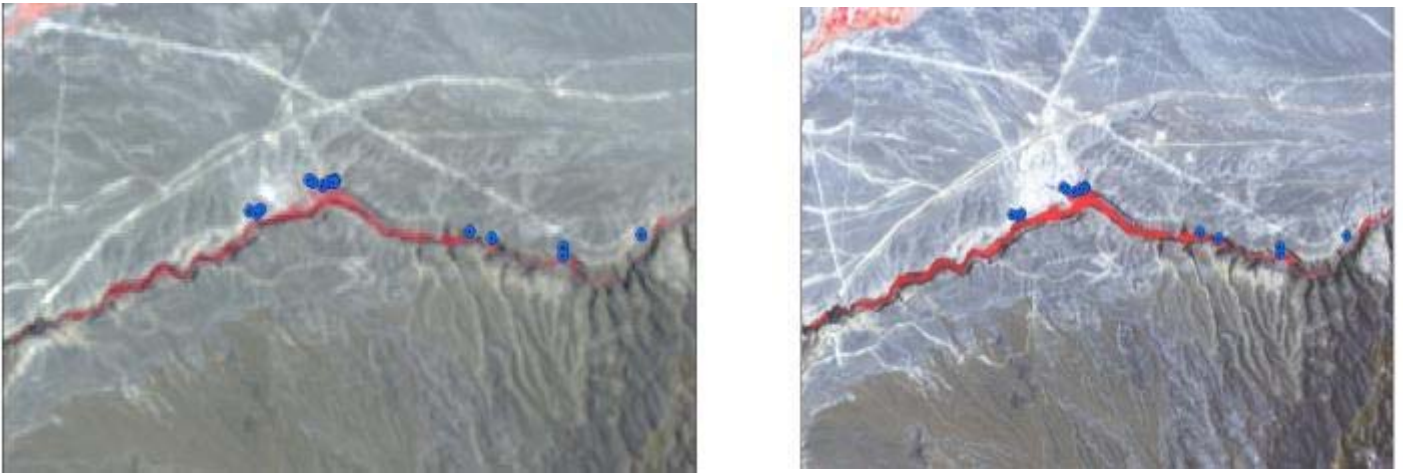
Se observa que en la vega de Huiculunche hay más vegetación presente en el año 1987 en comparación al año 2010.

En la ficha de la vega se menciona que hay intervención humana, por encontrar pozos de extracción de agua, sin embargo dentro de la capa de derechos de aguas, superficiales y subterráneos, no hay ninguno señalado para el sector cercano a la vega. Sin embargo en el bofedal de Ayquina, ubicado al este de Huiculunche hay al menos 13 derechos de agua superficiales. Este bofedal presenta una amenaza Alta, debido principalmente a la actividad turística y a la extracción de agua.



**Imagen 10:** Comparación de imágenes de la vega de Huiculunche. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1987 y la imagen de la derecha al 2010.





**Imagen 11:** Comparación de imágenes del Bofedal de Ayquina. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1987 y la imagen de la derecha al 2010. En azul se muestran los derechos de agua superficiales otorgados para el sector.

### **Inacaliri**

La vega de Inacaliri para el año 1987 presenta más vegetación que en el año 2010. Al ser muestreada su condición fue Mala por encontrarse seca la ocurrencia de agua

Su amenaza es alta, y es influenciada de igual forma por las tres actividades productivas.

Dentro del acuífero protegido se encontró un derecho de agua superficial. Sin embargo, fuera hay un pozo de agua subterráneo.

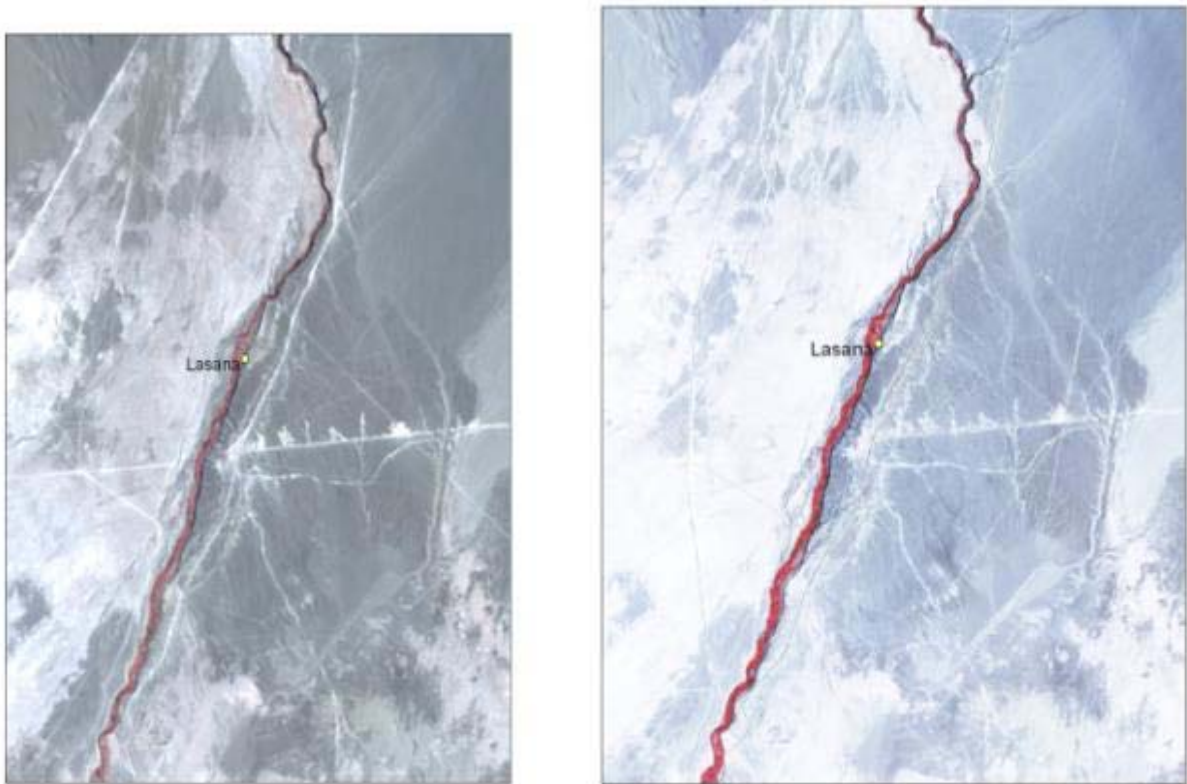




**Imagen 12:** Comparación de imágenes de la vega de Inacaliri. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1987 y la imagen de la derecha al 2010.

### **Lasana**

La vega de Lasana no presenta modificaciones en vegetación para los años que se compararon. Al ser muestreada su condición fue Regular por la vegetación que se encontró. Esta vega la utilizan para pastoreo, cultivo de hortalizas y alfalfa. Su amenaza global está afectada en gran medida por el turismo. Dentro del acuífero protegido encontramos dos pozos de agua subterránea y al menos 20 de agua superficial.



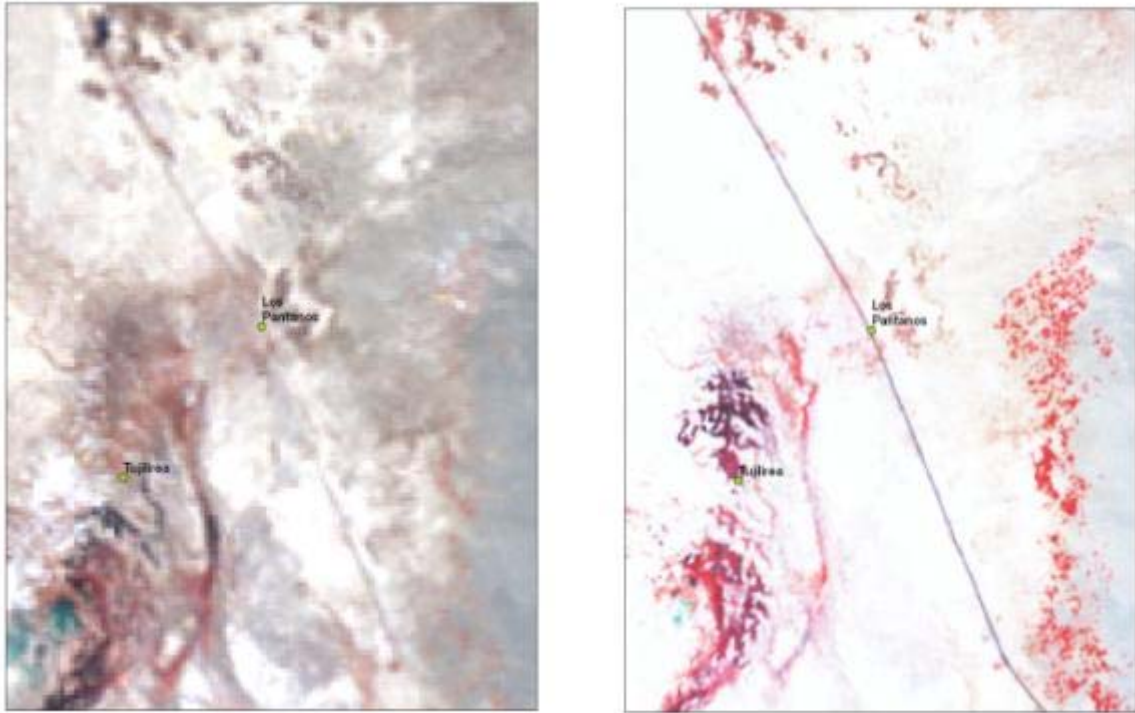
**Imagen 12:** Comparación de imágenes de la vega de Lasana. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1989 y la imagen de la derecha al 2010.

### Los Plátanos y Tujilireá

Al comparar las imágenes de los años en estudio se observa que aumentó la superficie de cultivos, además se ve que la vegetación en conjunto al cuerpo de agua próximo a Tujilireá disminuyó.

Ambos humedales una amenaza global Muy alta y está dada principalmente por la actividad turística y extracción de agua. La vega de los Plátanos también se ve afectada por el camino que la intercepta.

Dentro del Acuífero protegido al que pertenecen estas dos vegas hay 5 derechos de aguas subterráneas y un derecho de agua superficial.



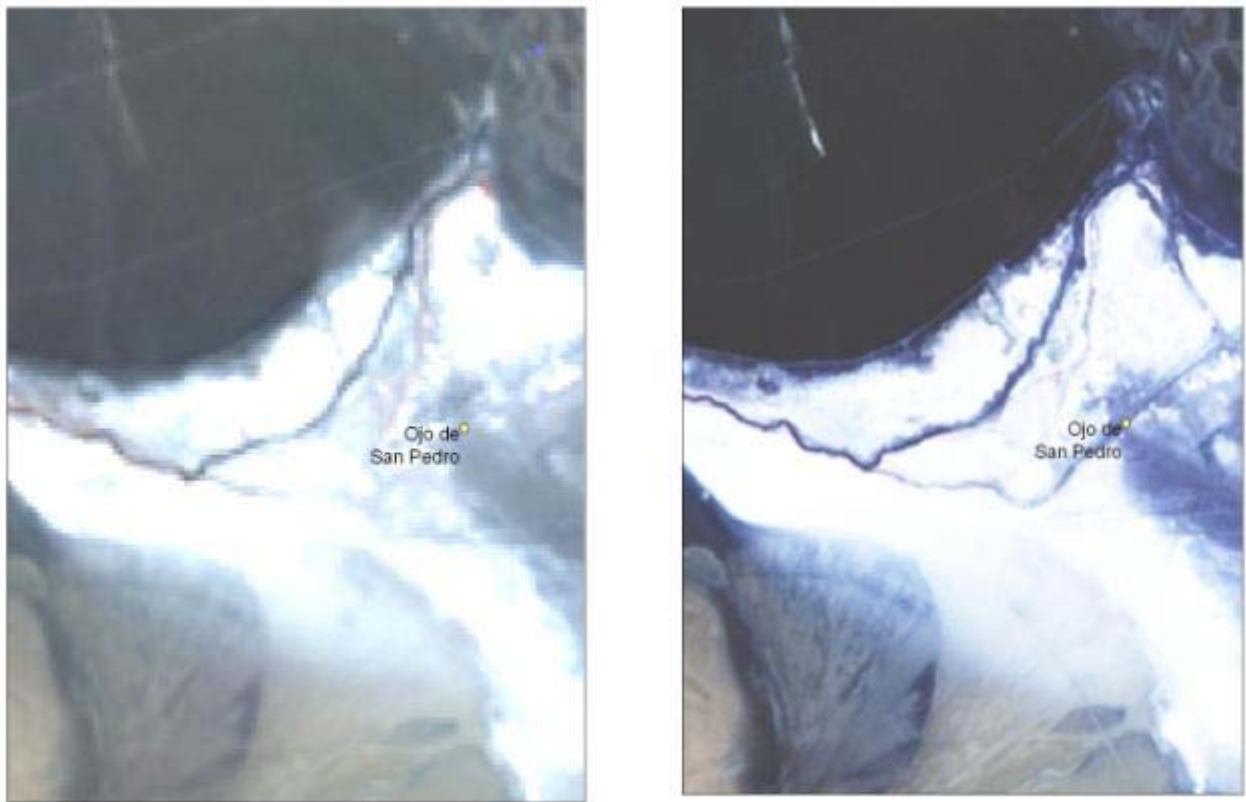
**Imagen 13:** Comparación de imágenes de la vega Los Platanos y Tujilirea. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1989 y la imagen de la derecha al 2010.

### Ojo de San Pedro

La comparación de imágenes para la vega Ojo de San Pedro nos muestra que en el año 1987 se veía más vegetación que en la imagen del 2010.

La amenaza global para esta vega es Alta y se debe principalmente a la extracción de agua que existe en esta zona. Cuando se visitó esta vega se encontró que su condición es Mala, pues estaba seca, sin ningún tipo de escurrimiento superficial. Dentro de la ficha de información se señala además que este humedal está seco debido a la explotación por Codelco.

Dentro del acuífero protegido existen nueve derechos de aguas subterráneas, motivo que debe explicar las condiciones actuales de este humedal.



**Imagen 14:** Comparación de imágenes de la vega de Ojo de San Pedro. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1987 y la imagen de la derecha al 2010.

## Olar

Las diferencias observadas en la comparación de imágenes para el Bofedal de Olar destacan en la pérdida de vegetación y el aumento de zonas de cultivos. La imagen Aster puede estar sobresaturada, impidiendo una correcta interpretación con respecto a la variación en la vegetación.

Al ser visitado se encontró que el acceso estaba en malas condiciones por lo que no se conoce su condición actual. No obstante su amenaza global es alta y se debe en mayor parte a la extracción de agua.

En el acuífero protegido que contiene esta vega hay un derecho de agua superficial y cinco subterráneos.



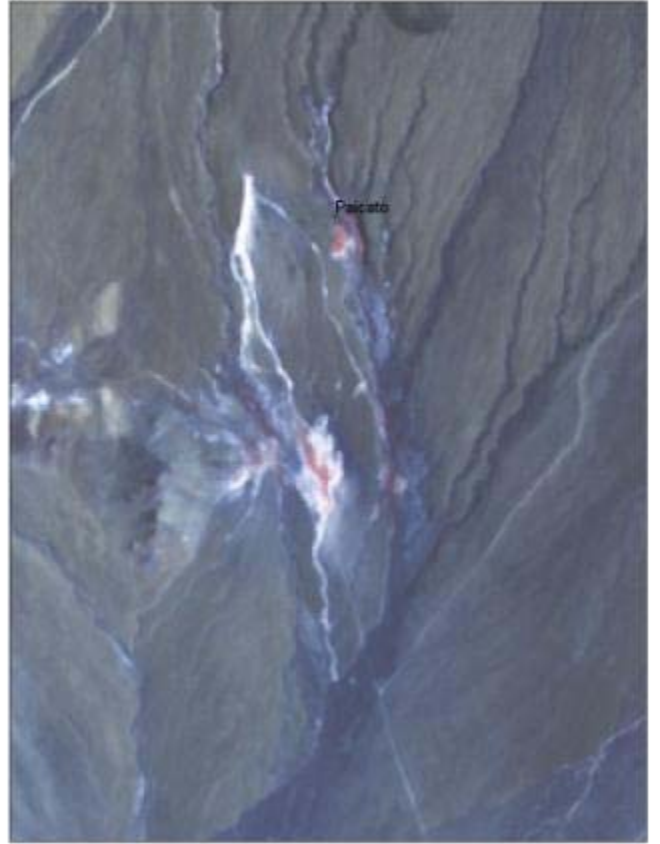
**Imagen 15:** Comparación de imágenes del Bofedal de Olar. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1989 y la imagen de la derecha al 2010.

### **Paicato**

Al comparar las imágenes de la vega de Paicato no se ven diferencias notables. Esto puede deberse a la poca resolución con que cuenta la imagen Landsat.

El Acuífero protegido que contiene a Paicato cuenta con 29 derechos de aguas superficiales y dos derechos de aguas subterráneas. Su amenaza global es debida en mayor parte al turismo y luego a la extracción de agua. No hay información sobre la condición de la vega.





**Imagen 16:** Comparación de imágenes de la vega de Paicato. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1989 y la imagen de la derecha al 2010.

## Palpana 2

En el bofedal de Palpana 2. disminuye el cuerpo de agua y la vegetación al borde del salar. La amenaza global se debe a la presión por turismo y en segundo lugar a la actividad Silvoagropecuaria.

En el acuífero protegido donde se encuentra existen 3 derechos de agua subterráneos, los tres pertenecientes a Codelco.



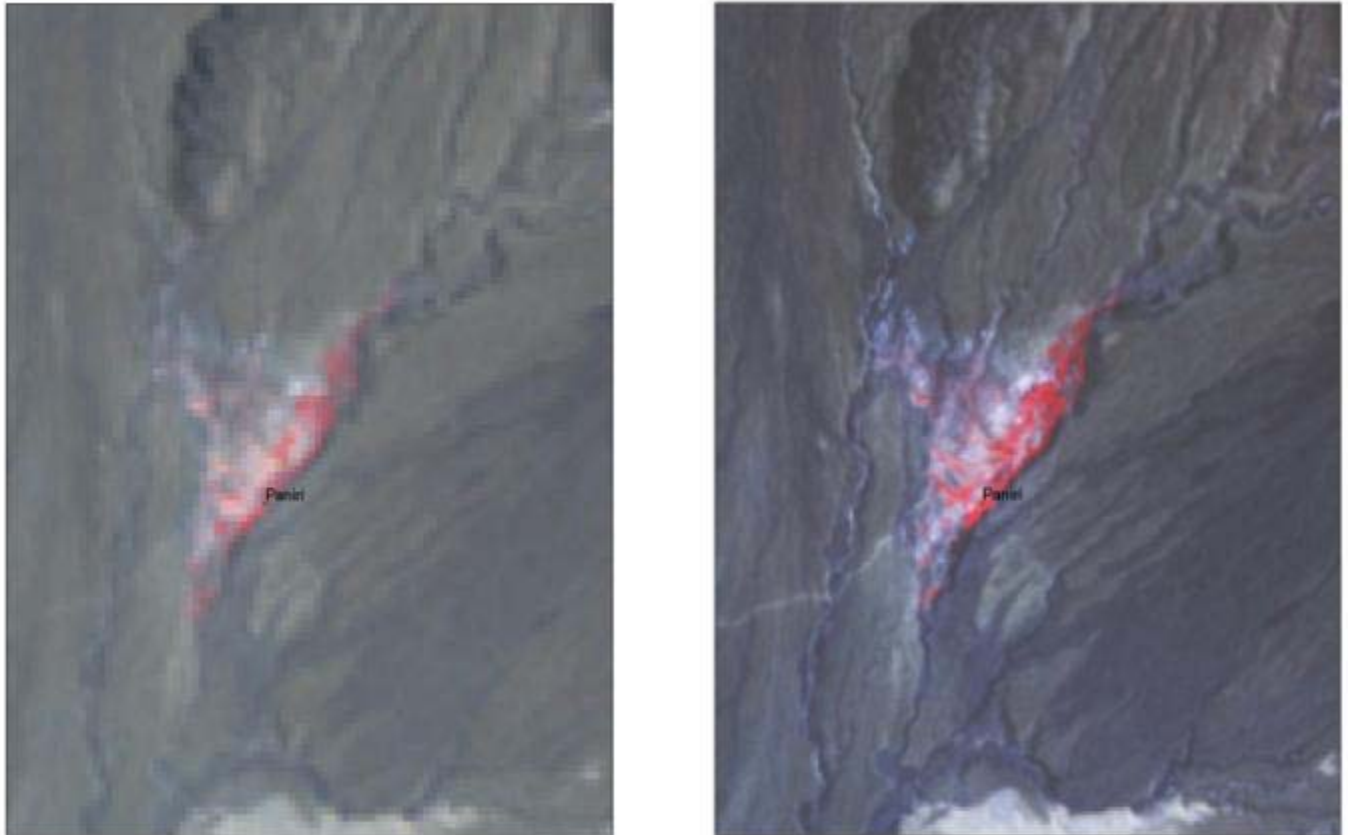
**Imagen 17:** Comparación de imágenes del Bofedal de Palpana 2. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1987 y la imagen de la derecha al 2010.

### **Paniri**

Debido a la calidad de la imagen Landsat no se ve claramente la vegetación en el año 1987, no obstante no existe una diferencia notable entre ambas imágenes. Esta vega no fue visitada en terreno por lo que no se conoce su condición.

El Acuífero protegido que contiene a Paniri cuenta con 29 derechos de aguas superficiales y dos derechos de aguas subterráneas.

La amenaza global está ponderada en mayor cantidad por el turismo y la actividad silvoagropecuaria.



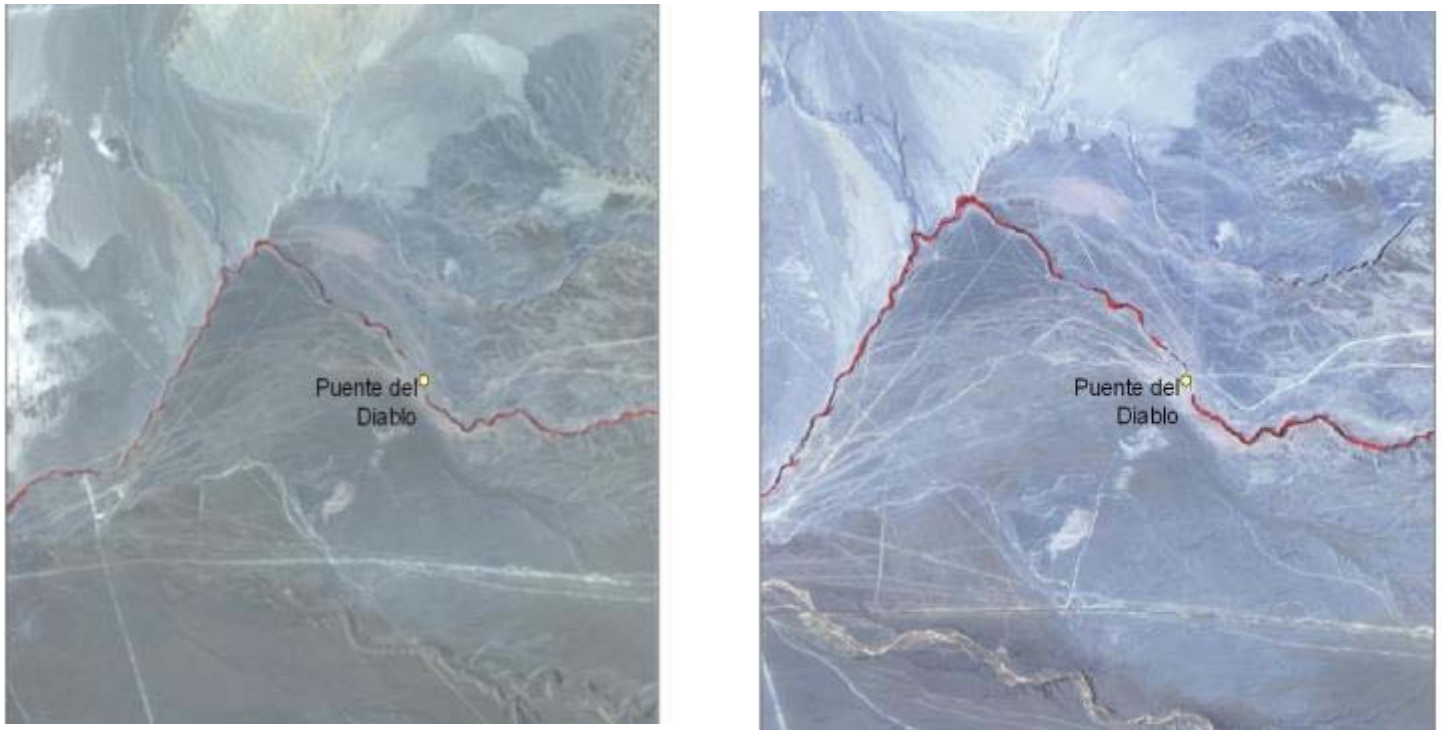
**Imagen 18:** Comparación de imágenes de la vega de Baltinache. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1987 y la imagen de la derecha al 2010.

### **Puente del Diablo**

En el análisis comparativo de las imágenes no se observa diferencia en cuanto a la vegetación. La condición de esta vega no se conoce ya que no se muestreo, sin embargo según la ficha, Puente del Diablo está seca sin tener vegetación ni ocurrencia.

La amenaza que se calculo es alta y se debe principalmente a la actividad silvoagropecuaria y por extracción de agua.

El Acuífero protegido que contiene a la vega Puente del Diablo cuenta con 29 derechos de aguas superficiales y dos derechos de aguas subterráneas

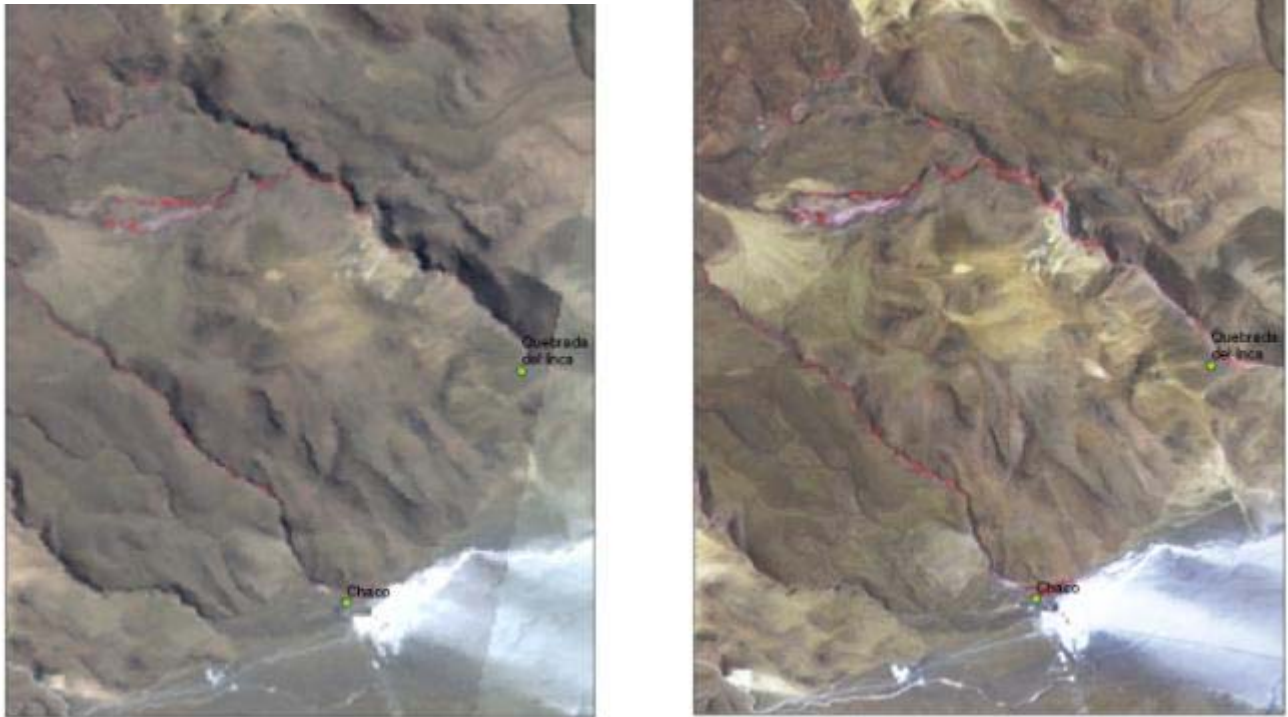


**Imagen 19:** Comparación de imágenes de la Puente del Diablo. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1987 y la imagen de la derecha al 2010.

### **Quebrada del Inca y Chaco**

Las imágenes de las vegas de Quebrada del Inca y Chaco no muestran diferencias comparativas para los distintos años en el análisis. Las diferencias que se pueden observar es por el mayor contraste que presenta la imagen Aster en comparación a la Landsat.

Ambas vegas tienen una amenaza Muy Alta por turismo y extracción de agua. Dentro del acuífero que contiene a las vegas se encuentra un derecho de agua superficial y cinco de aguas subterráneas.



**Imagen 20:** Comparación de imágenes de las vegas de Quebrada del Inca y Chaco. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1987 y la imagen de la derecha al 2010.

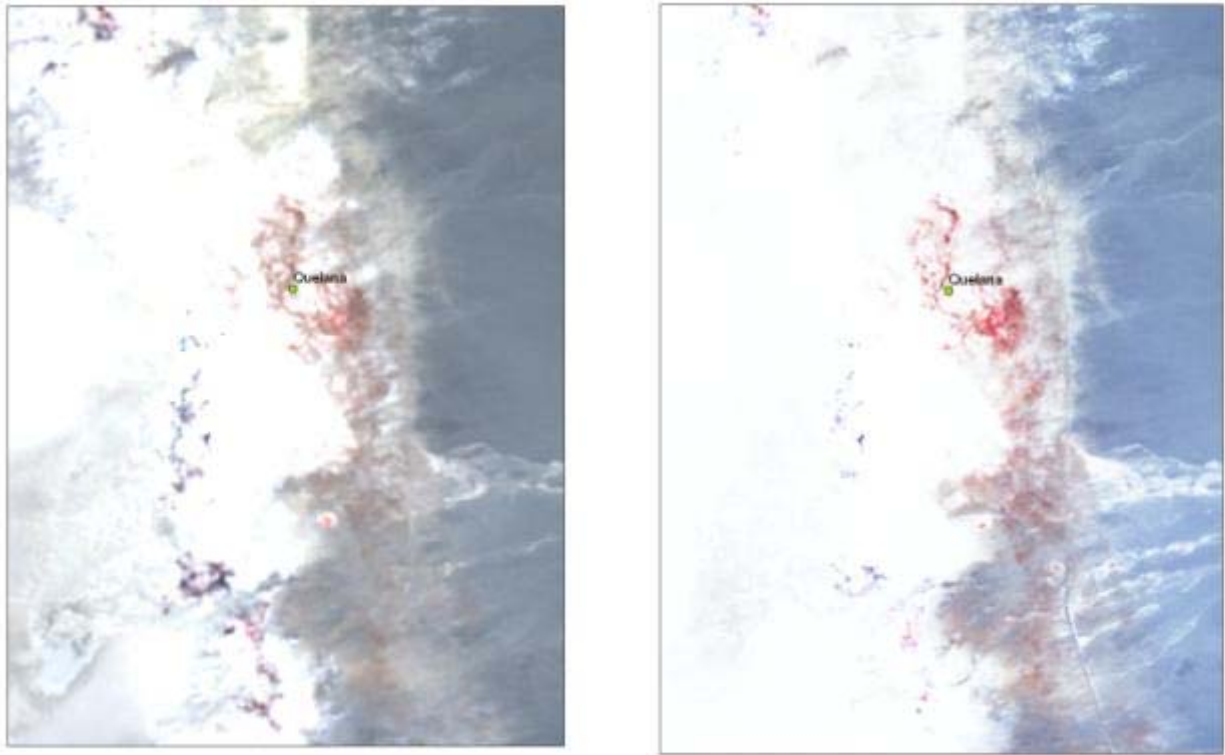
## Quelana

Al comparar las imágenes del bofedal de Quelana se ve que la vegetación se mantiene con respecto al año 2010, sin embargo la imagen Aster está sobresaturada por lo que puede haber un pequeño error de mal interpretación, además de las sombras que se ven en la imagen Landsat.

La amenaza de Quelana es muy alta y se debe principalmente a la extracción de agua y secundariamente por presión de las actividades turísticas y silvoagropecuarias. En la ficha del bofedal se comenta que hay intervención antrópica por el hallazgo de pozos secos en el sector y que además escarbando un poco se observa humedad.

En el sector norte del acuífero donde está el bofedal de Quelana se encuentran 5 pozos de aguas subterráneas y al oeste de Quelana hay un pozo de agua superficial.





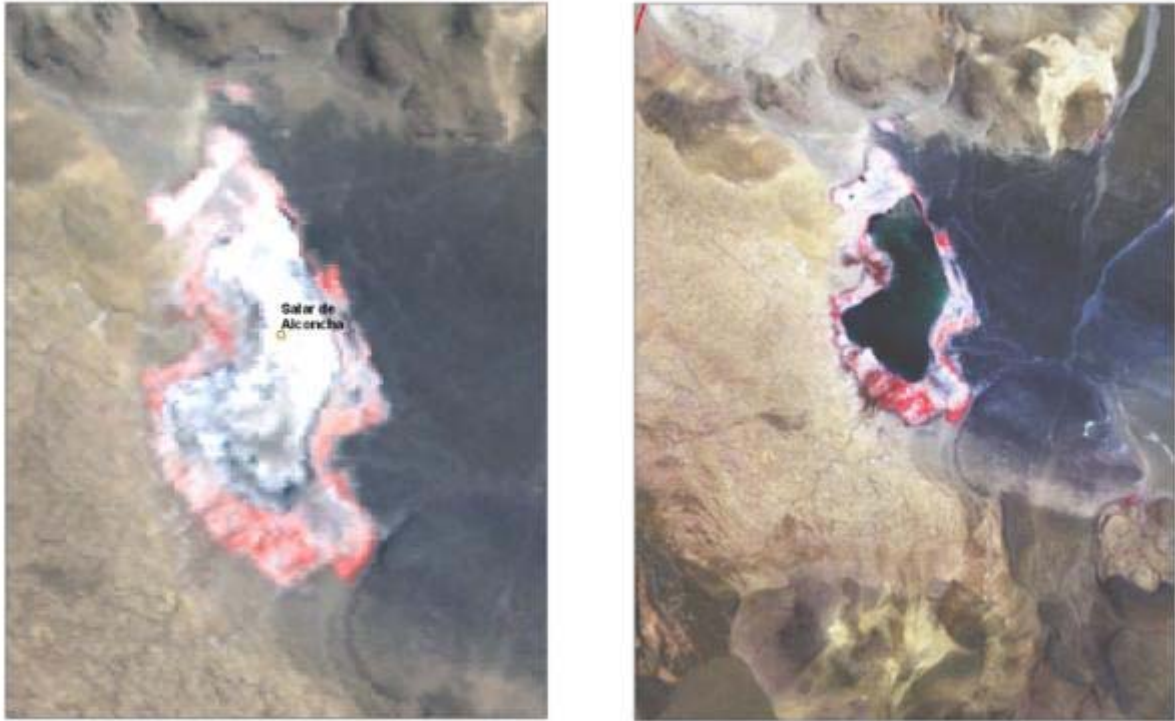
**Imagen 21:** Comparación de imágenes de la vega de Quelana. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1989 y la imagen de la derecha al 2010.

### **Salar de Alconcha**

Al realizar una comparación de las imágenes del Bofedal Salar de Alconcha, se observa un aumento de la vegetación, se considera que este aumento no es tal ya que influye el mes en que fue tomada la imagen ya que la laguna está descongelada. Al ser visitada la condición del bofedal fue Buena.

En cuanto a la amenaza que presenta el Salar de Alconcha se determinó que es Alta y se debe a la extracción de agua y la actividad turística.

En el acuífero protegido por la DGA, donde está el salar hay dos derechos de agua subterráneos y uno superficial.



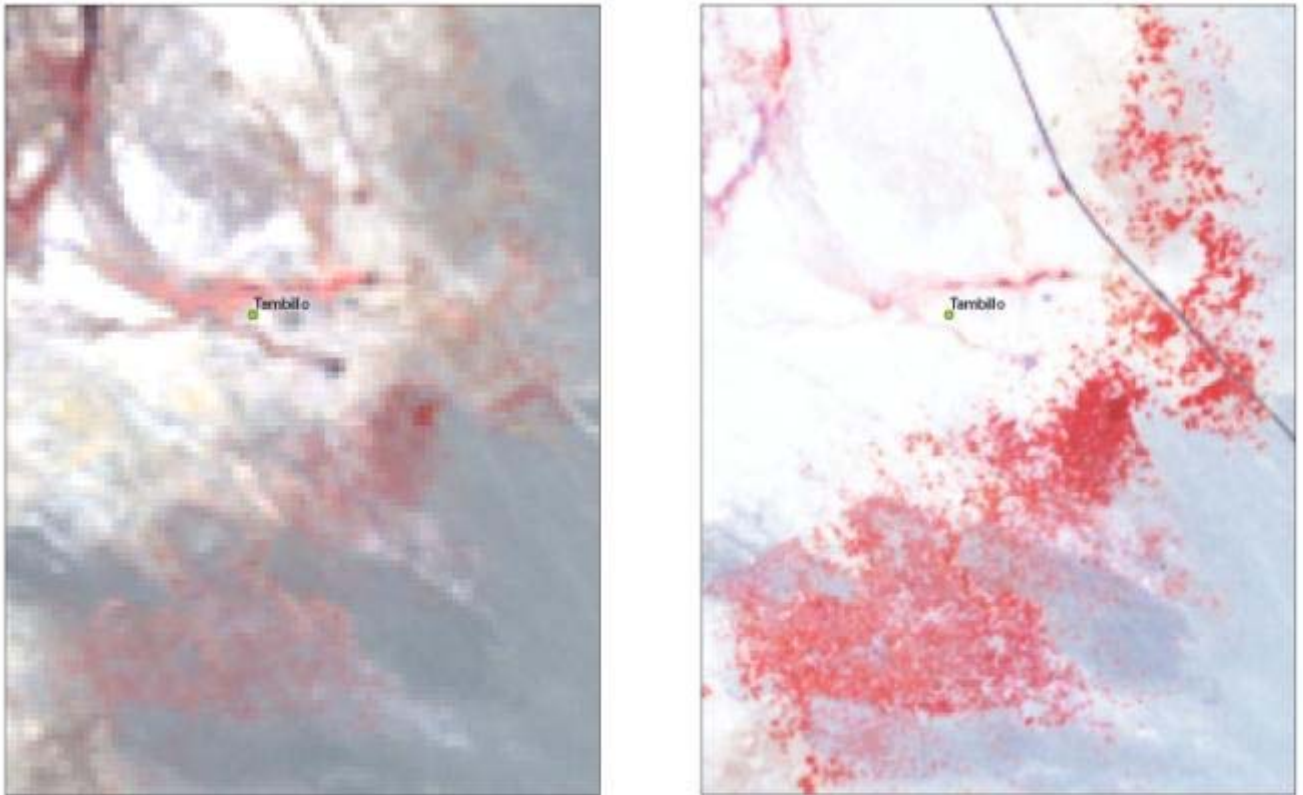
**Imagen 22:** Comparación de imágenes del Salar de Alconcha. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1987 y la imagen de la derecha al 2010.

### **Tambillo**

En la imagen del 2010 del bofedal de Tambillo se observa un notable aumento de las zonas de cultivo, además de una disminución de la vegetación asociada al curso de agua.

La condición de Tambillo es de Regular, y su amenaza se considero Muy Alta debido a la extracción de agua que se realiza en el lugar. En el sector norte del acuífero que contiene al bofedal encontramos 5 derechos de aguas subterráneos y al sur-oeste de Tambillo hay un pozo de aguas superficiales. Todo esto afecta el funcionamiento normal de este sistema.

En la ficha se comenta que el recurso tiene un uso en pastoreo y que hay extracción de agua mediante un pozo que no se considera dentro de los mencionados con anterioridad.



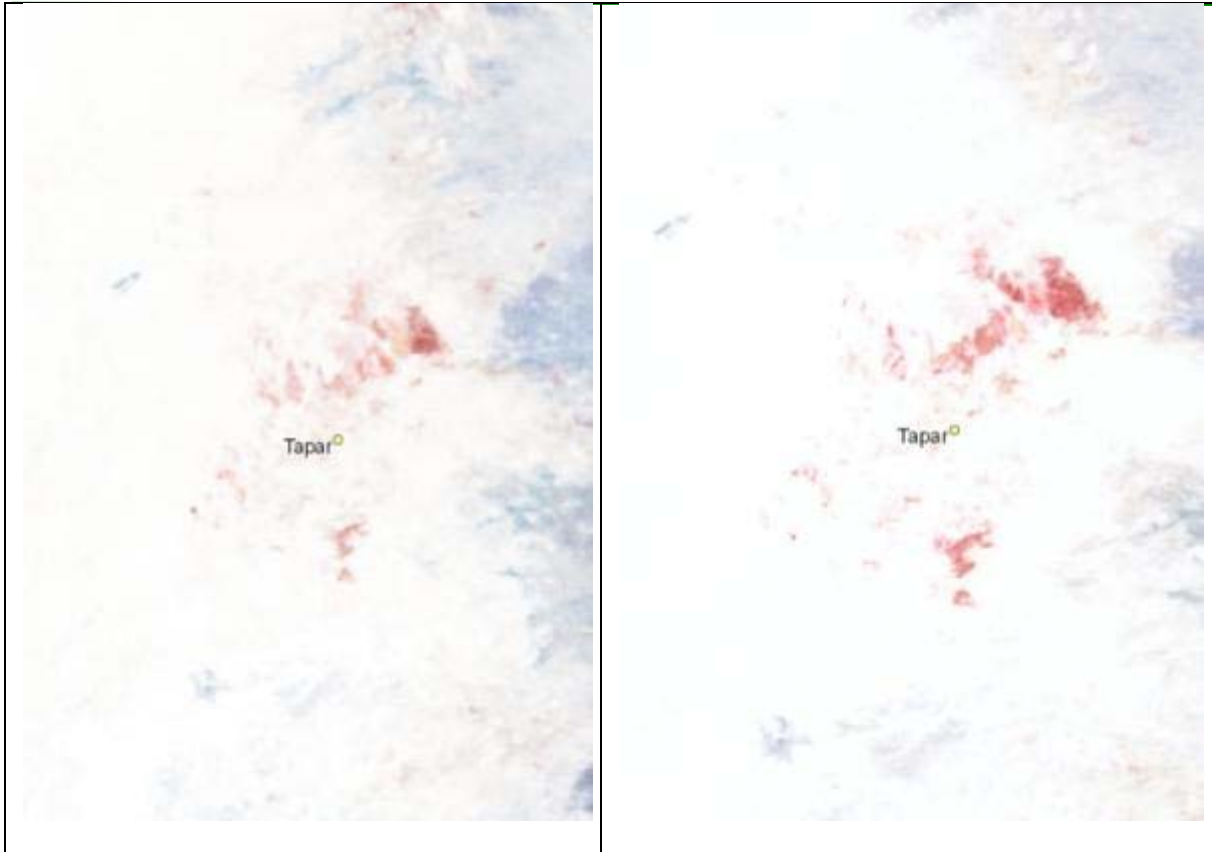
**Imagen 23:** Comparación de imágenes del Bofedal de Tambillo. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1989 y la imagen de la derecha al 2010.

### **Tapar**

Se observa que la vegetación de la imagen Aster 2010 es mayor en relación al año 1989, sin embargo esta vega no se muestro por lo tanto no está la condición actual del bofedal, para corroborar que lo observado es así.

Este Bofedal pertenece al mismo acuífero mencionado anteriormente, por lo que cuenta con la misma cantidad de pozos que podrían estar afectando el funcionamiento del sistema

La amenaza de Tapar es Alta y se debe principalmente a la extracción de agua presente en el lugar.



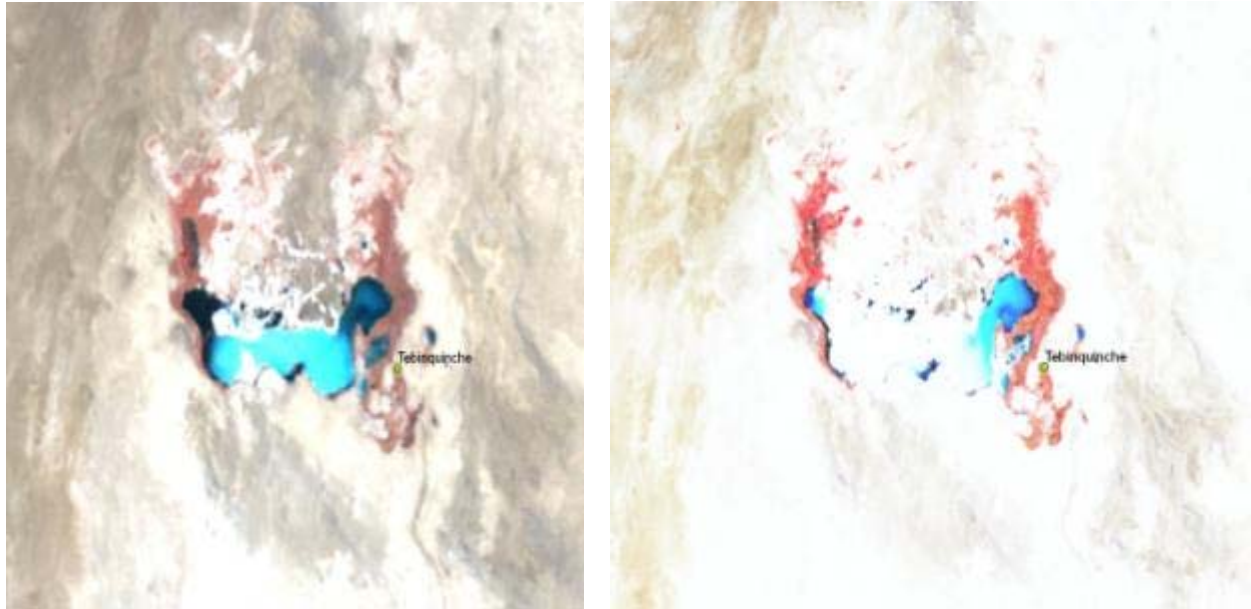
**Imagen 24:** Comparación de imágenes del bofedal de Tapar. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1989 y la imagen de la derecha al 2010.

### **Tebinquinche**

En el análisis comparativo del Bofedal de Tebinquinche se observa que hay pérdida de vegetación y una pequeña disminución de los cursos de agua. Cabe destacar que la imagen del 2010 esta sobresaturada, por lo que cuesta identificar bien las diferencias entre un año y otro.

Tebinquinche presenta una amenaza Muy Alta debido principalmente a la extracción de agua y presión por actividad Turística. Al ser muestreado se considero que su condición es Buena

Está sometido a la misma presión por extracción de agua que los dos humedales mencionados con anterioridad, ya que pertenece al mismo acuífero protegido



**Imagen 25:** Comparación de imágenes del bofedal de Tebinquinche. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1989 y la imagen de la derecha al 2010.

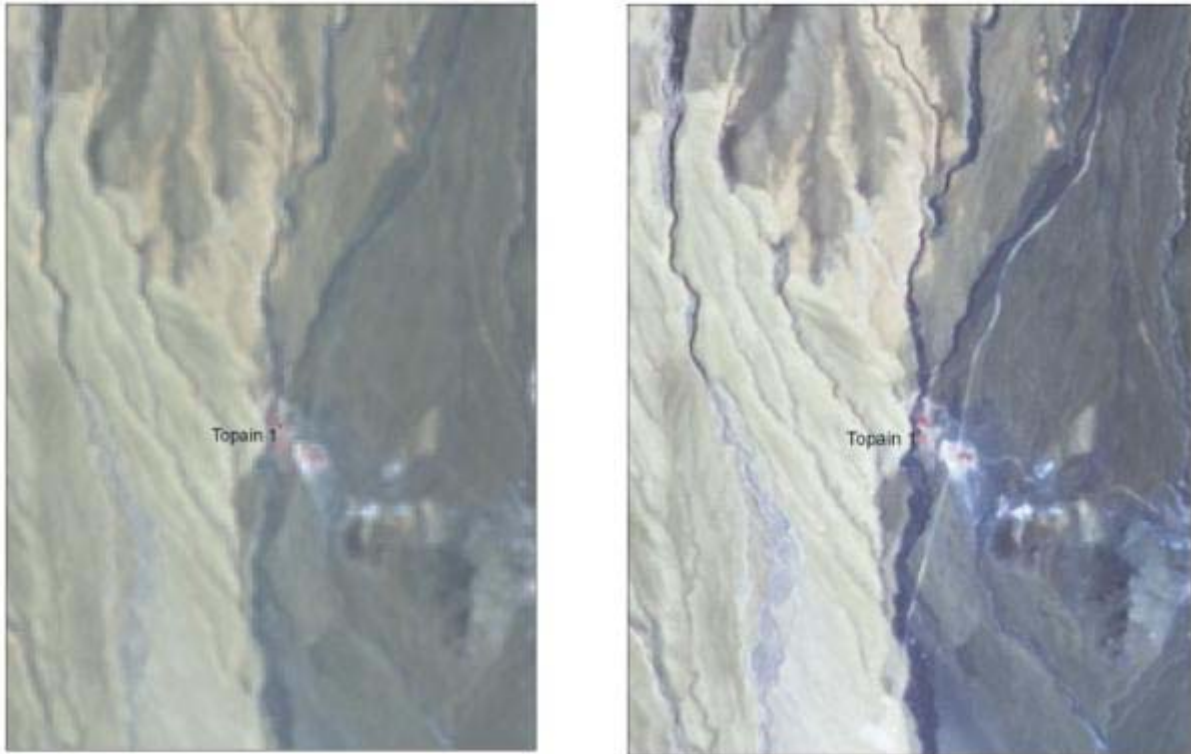
### **Topain 1**

La vega Topain 1 no muestra diferencias de vegetación para los años utilizados en el análisis.

La amenaza de este humedal se considera alta, y el turismo, las actividades silvoagropecuarias y la extracción de agua ponderan de igual manera. No se muestreo por lo que no está la condición del lugar.

Hacia el noreste de Topain 1 hay al menos 5 pozos de extracción de agua superficial lo que podría influir en el sistema.





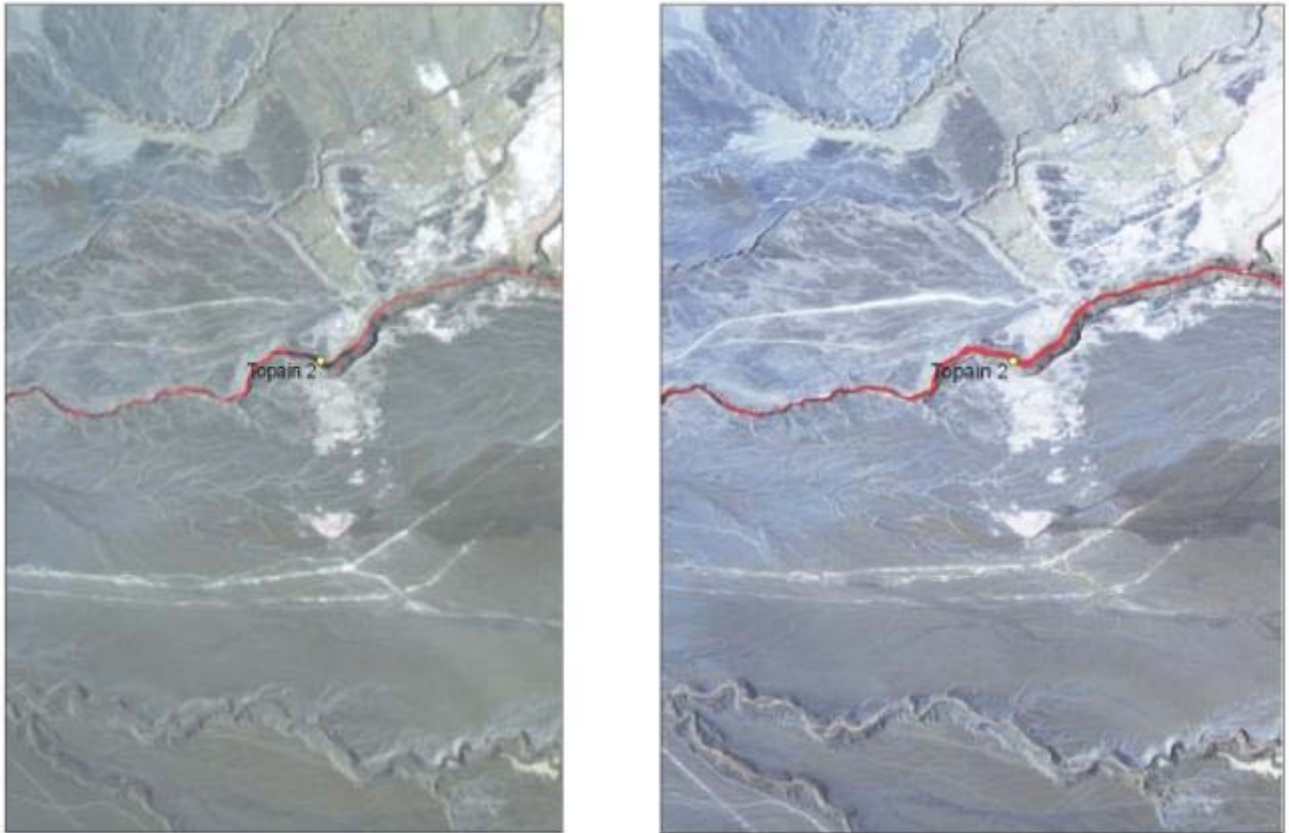
**Imagen 26:** Comparación de imágenes de la vega de Topain 1. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1989 y la imagen de la derecha al 2010.

## Topain 2

En la comparación de imágenes de la vega Topain 2 no se encuentran diferencias en cuanto a la vegetación asociada al curso de agua.

La amenaza de esta vega es alta y se debe principalmente a la extracción de Agua y la actividad silvoagropecuaria. Sin embargo al no ser visitada en terreno no se tiene la condición actual del lugar

Aguas arriba de Topain 2 y dentro del acuífero protegido, hay alrededor de 14 derechos de agua superficiales, lo que se considera como amenaza a este humedal.



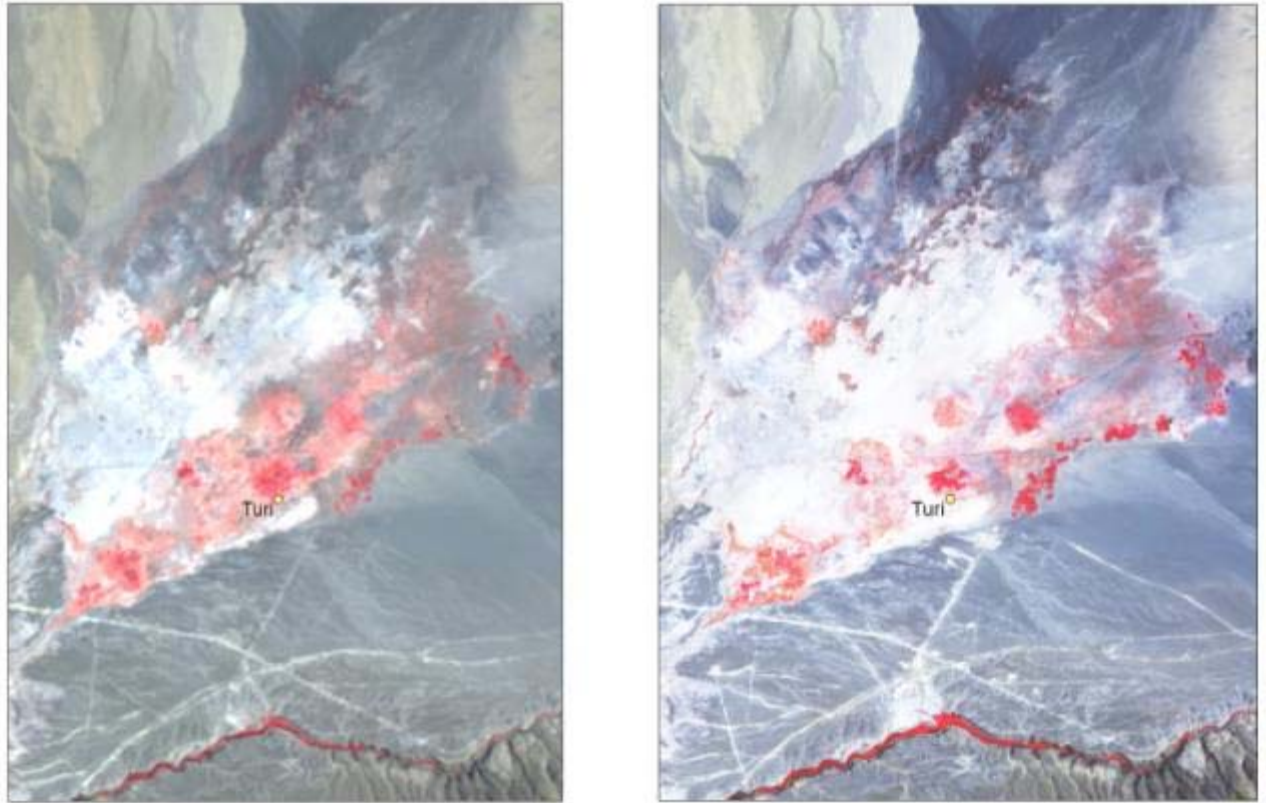
**Imagen 27:** Comparación de imágenes de la vega de Topain 2. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1987 y la imagen de la derecha al 2010.

## **Turi**

Al comparar los cambios de vegetación para la vega de Turi, se observa que hay pérdida de vegetación y aumentaron las zonas de cultivos.

En la zona norte del acuífero protegido donde está la vega de Turi encontramos 6 pozos de aguas superficiales.

La amenaza global de Turi es Alta y la actividad turística es la que más pondera. La condición de esta vega es Regular



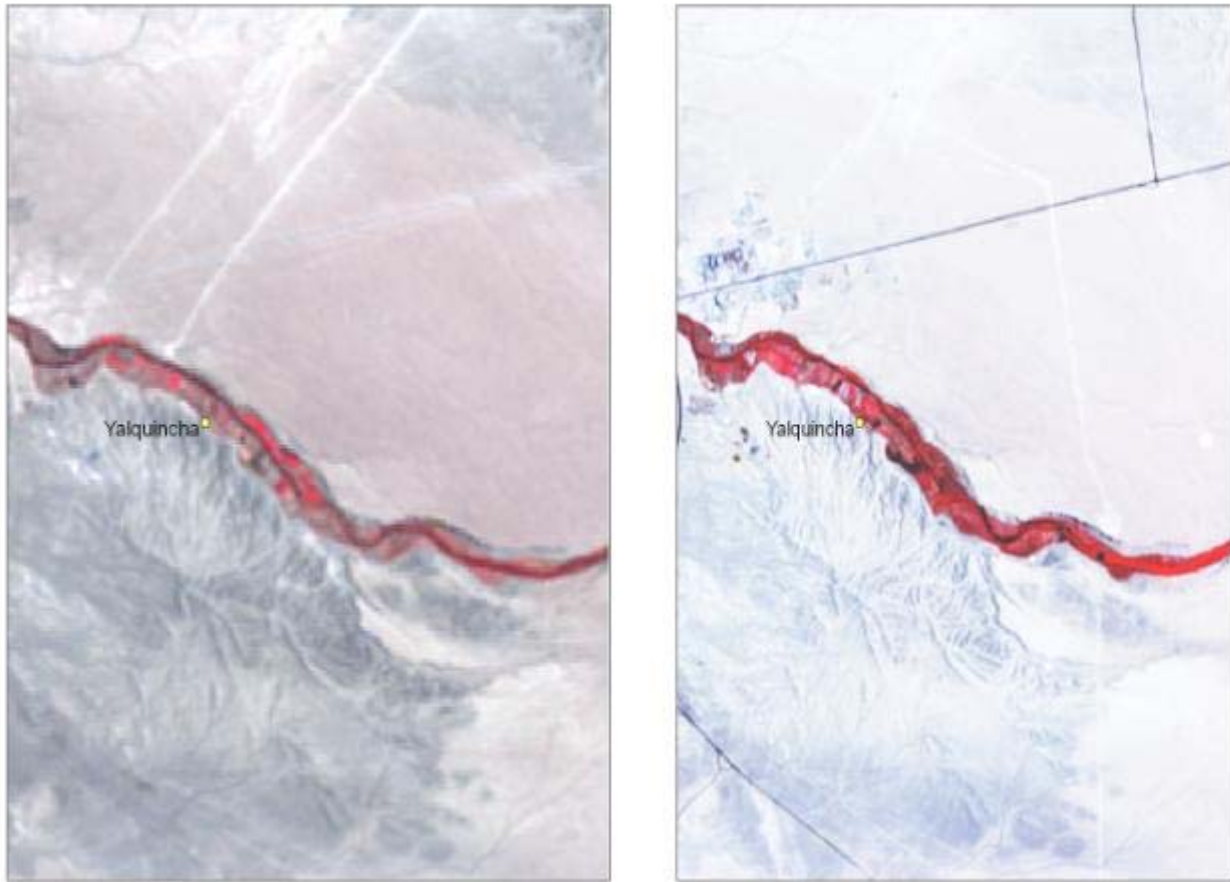
**Imagen 28:** Comparación de imágenes de la vega de Turi. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1987 y la imagen de la derecha al 2010.

### **Yalquincha**

En el bofedal de Yalquincha no se observa diferencia para la vegetación, sí se ven más claramente los cultivos en la imagen Aster que en la imagen Landsat.

La amenaza de Yalquincha es alta y la actividad que más pondero es el turismo y la extracción de agua.

Dentro del acuífero protegido hay 8 pozos de aguas subterráneos.



**Imagen 29:** Comparación de imágenes de la vega de Yalquincha. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1990 y la imagen de la derecha al 2010.

### **Yona Grande**

Se observa en las imágenes que hay más vegetación en la imagen del año 1989 en comparación al año 2010. Lo mismo sucede con los cuerpos de agua, aunque esta diferencia puede deberse a la fecha en que fue capturada la imagen, ya que podría estar congelada en algunos sectores. Además la imagen Aster está sobresaturada, por lo que se pierde en parte las zonas con vegetación.

La amenaza que presenta es Muy Alta y se debe principalmente a la extracción de agua. Este bofedal no fue visitado por lo que no se tiene información sobre su condición.

El acuífero al que pertenece Yona Grande posee cinco pozos de aguas subterráneas y uno de agua superficial.





**Imagen 30:** Comparación de imágenes del Bofedal de Yona Grande. A la izquierda se muestra la imagen correspondiente a 1989 y la imagen de la derecha al 2010.



En la Tabla 1, se muestra un resumen del Análisis Temporal para los Humedales presentes dentro de los acuíferos protegidos por la Res 529 de 2003 de la DGA, utilizando las imágenes del periodo de 1987-2010.

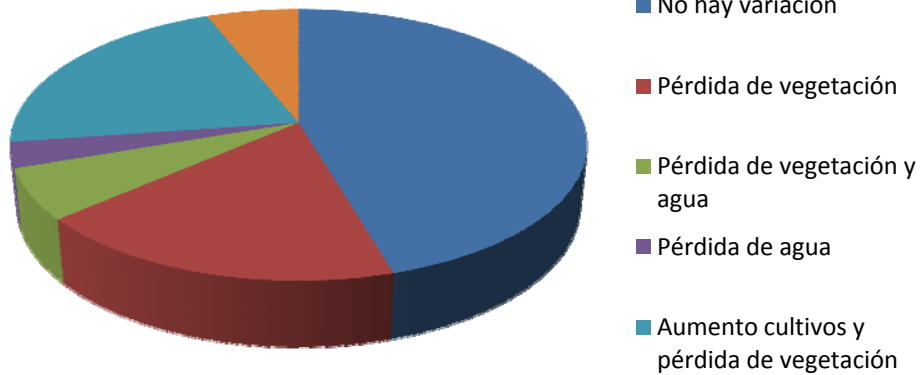
Nombre_Humedal	Amenaza	Condición	Obs
Quebrada del Inca	MUY ALTA	No se muestreo	No hay variedad
Chaco	MUY ALTA	No se muestreo	No hay variedad
Borde Sureste Ascotari	MUY ALTA	Malo	Pérdida de agua o podría estar congelada.
Paniri	MUY ALTA	No se muestreo	No hay variedad
Paicato	MUY ALTA	No se muestreo	No hay variedad
Oyape	MUY ALTA	Regular	No hay variedad
Baltinache	MUY ALTA	No se muestreo	Aumento de la vegetación
Cejas	MUY ALTA	No se muestreo	Pérdida de vegetación
Yona Grande	MUY ALTA	No se muestreo	Pérdida de vegetación
Los Plátanos	MUY ALTA	No se muestreo	Crecimiento del bosque de Tamarugal, por lo que hay aumento de cultivos y pérdida de vegetación.
Tujilirea	MUY ALTA	No se muestreo	Aumento de cultivos y pérdida de vegetación
Tambillo	MUY ALTA	Regular	Aumento de cultivos y pérdida de vegetación. Crecimiento Bosque Tamarugal
Tebinquinche	MUY ALTA	Bueno	Pérdida de vegetación y disminución de cursos de agua.
Carvajal	MUY ALTA	No se muestreo	Pérdida de vegetación
Quelana	MUY ALTA	Regular	No hay variedad
Churchicha	ALTA	No se muestreo	No hay variedad
Alconcha	ALTA	No se muestreo	No hay variedad. No se distingue la vega en ninguna de las dos imágenes, tampoco en Google Earth
Guallatani	ALTA	No se muestreo	No hay variedad
Salar de Alconcha	ALTA	Bueno	No hay variedad
Palpana 2	ALTA	No se muestreo	Pérdida de vegetación y agua.
Ojo de San Pedro	ALTA	Malo	Pérdida de vegetación
Inacaliri	ALTA	Malo	Pérdida de Vegetación
Topain 1	ALTA	No se muestreo	No hay variedad
Lasana	ALTA	Regular	No hay variedad
Turi	ALTA	Regular	Pérdida de vegetación notable y pequeño aumento de agricultura
Huiculunche	ALTA	No se muestreo	Pérdida de Vegetación
Puente del Diablo	ALTA	No se muestreo	No hay variedad
Topain 2	ALTA	No se muestreo	No hay variedad
Chiu Chiu	ALTA	Regular	Pérdida de vegetación y más definidas zonas de agricultura
Yalquincha	ALTA	No se muestreo	No hay variedad
Calama	ALTA	No se muestreo	Aumenta la urbanización y Agricultura y se pierde vegetación
Olar	ALTA	No se muestreo	Pérdida de vegetación y aumento de zonas de cultivos.
Tapar	ALTA	No se muestreo	Aumento de vegetación

**Tabla 1:** Resumen del Análisis temporal para los humedales con amenaza Alta y Muy Alta

Cabe señalar que la vega de Oyape y el bofedal de Alconcha, no presentaron ninguna variación al comparar las imágenes de 1989 -2010, periodo para la vega y 1987-2010 para el bofedal, por lo que no se incluyeron dentro del análisis específico para cada humedal.

Los cambios observados en la comparación de imágenes recaen en 6 tipos de cambios. En el gráfico N° 1 se muestra que en la mayoría de los humedales en estudio, 15 de un total de 33, no hubo variación al respecto. No obstante en 6 casos hay pérdida de vegetación y en 7 pérdida de vegetación además del aumento de cultivo.

### Cantidad de Humedales por Tipo de Variación

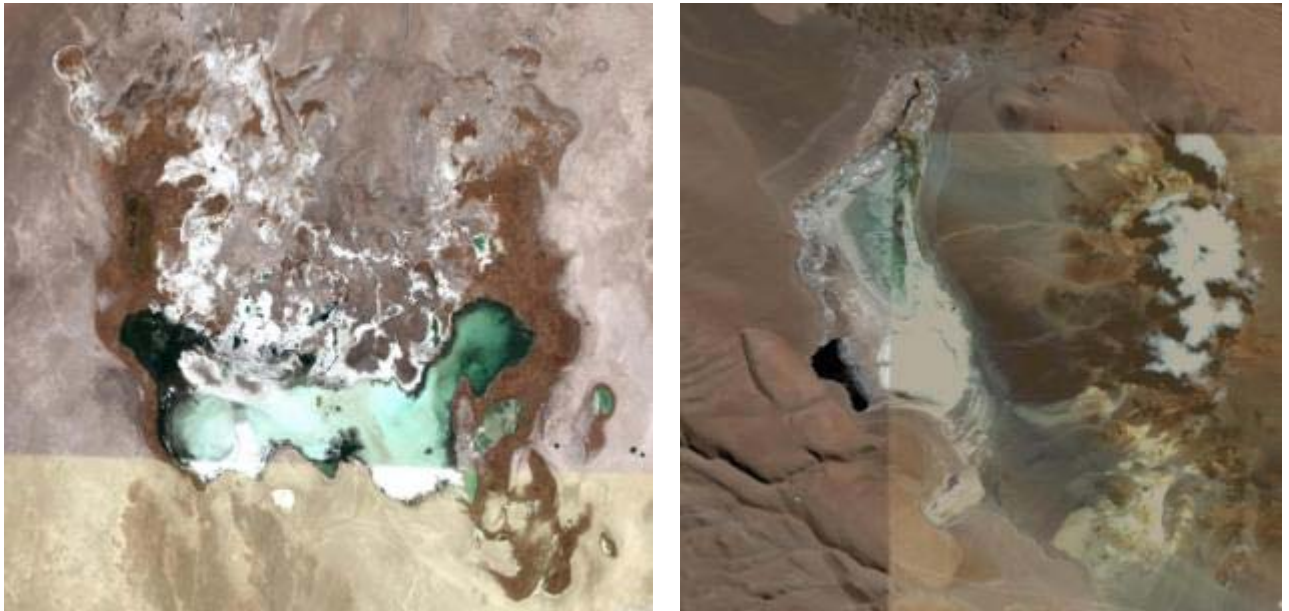


A modo de observación destacamos el estado de la Vega de Ojos de San Pedro cuya comparación de imágenes arrojó una pérdida de vegetación, sumado a tener una condición de Malo y estar cercano a 9 pozos de aguas subterráneas. Otro caso es Inacaliri que también destaca por su condición y su pérdida de vegetación según el análisis de imágenes. Ambas presentan una amenaza Global Alta, por lo que se corrobora que el índice calculado como amenaza global está bien utilizado.

#### 4. Análisis Multitemporal de la vega de Tebinquinche y el bofedal de Aguas Calientes 3, en base a la aplicación del Índice de Diferencias de Vegetación Normalizado (NDVI) y el Índice de Diferencia de Agua Normalizado (NDWI)

Dentro del Informe Final de Trabajo de la Práctica Profesional realizada en CIREN por la alumna de Geografía, Daniela Alegría, se realizó un análisis temporal para dos humedales dentro del área de estudio. Los sitios corresponden a la Vega de Tebinquinche (339,1 hás) y Bofedal de Aguas Calientes 3 (116,6 hás). Se escogieron estos lugares dado que ambos cuentan con información satelital de Landsat y Aster, y poseen vegetación factible de discriminar, dada la escala de análisis, para posteriormente llevar a cabo los geoprocesamientos.

Ambos humedales se distinguen por ser ecosistemas con vegetación azonal; por la riqueza de especies de flora y fauna (biodiversidad); por su importancia para el desarrollo de población indígena, representando fuente de recurso hídrico y alimentario; y por su valor paisajístico asociado a la actividad turística. Cabe señalar que la Vega de Tebinquinche fue catalogada, al ser muestreada, con una condición Buena, sin embargo posee una Amenaza Global Muy Alta por Extracción de Agua y Presión por Turismo. El bofedal de Aguas Calientes 3 presentó una condición Mala, debido principalmente, a la poca vegetación y por estar seca al momento de visitarla. Este Humedal tiene una Amenaza Baja, siendo la Presión por Turismo la amenaza que más ponderó.



**Imagen 1:** Áreas de estudio a las que se les aplicó los índices NDVI y NDWI. A la izquierda encontramos la Vega de Tebinquinche y a la derecha el Bofedal de Aguas Calientes 3.

Las imágenes utilizadas para la aplicación de los índices fueron Landsat 5 TM, con una resolución espacial de 30 mt. Las fechas con las que se trabajó fueron las siguientes:

- Tebinquinche: 27/10/1989 y 18/12/1999
- Aguas Calientes 3: 27/10/1989 y 18/12/1999

Para el caso de las imágenes Aster, con una resolución espacial de 15 mt., las fechas de las imágenes fueron:

- Tebinquinche: 31/10/2002 y 13/12/2006
- Aguas Calientes 3: 09/04/2003 y 13/12/2006

Los índices aplicados fueron seleccionados para discriminar la cubierta vegetal y la cubierta agua, dado que ambas variables son importantes para el desarrollo del ecosistema humedal. Los índices seleccionados son:

**NDVI (*Índice de diferencias de vegetación normalizado*)**

Índice espectral que mide el estado de la vegetación, respecto de la diferencia del nivel de reflectividad que presenta la cubierta vegetal en el rango del Rojo y del infrarojo cercano IRC. Varía entre 1 y -1, representando el 1 el mejor estado fisiológico, vegetación abundante (biomasa) o el mejor vigor vegetacional.

$$\text{NDVI} = \frac{P_{i,j, \text{IRC}} - P_{i,j, \text{R}}}{P_{i,j, \text{IRC}} + P_{i,j, \text{R}}}$$

**NDWI (*Índice de diferencia de agua normalizado*)**

Índice espectral que mide el grado de humedad o presencia de cuerpos de agua respecto del alto contraste en los niveles de reflectividad en el verde del espectro visible y baja reflectividad en el IRC. Varía entre 1 y -1, siendo 1 superficies con agua, y -1 superficies con cobertura vegetal estresada.

$$\text{NDWI} = \frac{P_{i, \text{V}} - \rho_i \text{IRC}}{\rho_i \text{V} + \rho_i \text{IRC}^2}$$

---

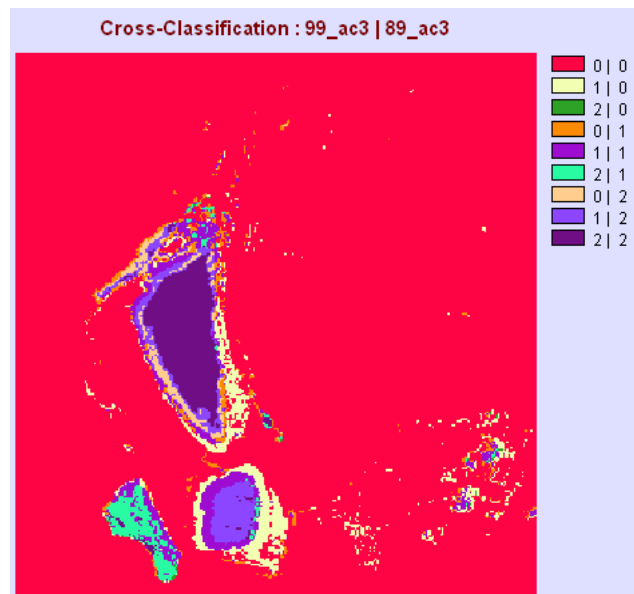
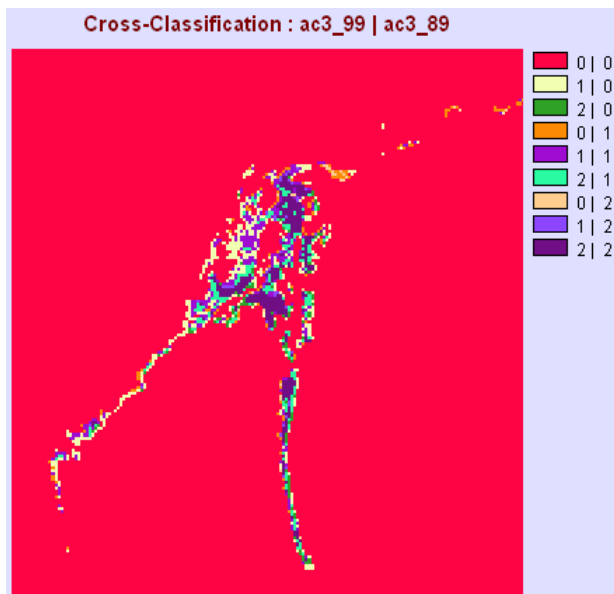
Una vez obtenidas las imágenes previamente clasificadas y homologadas, se realizó el cruce para ambos sectores en los dos periodos correspondientes (1989-1999 y 2000-2010), donde se obtuvo resultados cuantitativos (aumento, decrecimiento y mantención en áreas), y la respectiva representación espacial.

### Bofedal Aguas Calientes 3. 1989-1999

Al analizar el NDVI en este periodo existe crecimiento tanto de la clase vegetación como vegetación-agua (ver anexo), siendo esta última la que aumenta mayoritariamente, sobre suelo que anteriormente se encontraba desnudo. Al analizar el NDWI la clase agua superficial aumenta en mayor medida sobre suelo desnudo y por conversión sobre la clase agua profunda. Por tanto, las clases de vegetación aumentan su superficie a medida que la superficie de la clase agua superficial aumenta sobre suelo desnudo. La clase vegetación es la que mantiene mayoritariamente su superficie dentro del periodo, al igual que la clase agua profunda, por tanto la condición de humedad propicia el mantenimiento y aumento de la vegetación.

#### Aumento Vegetación y Vegetación-Agua

#### Aumento Agua Superficial



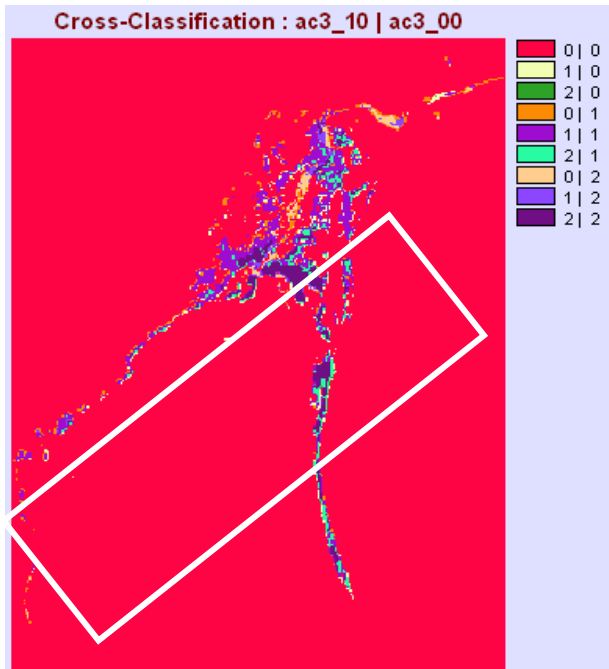


### Bofedal Aguas Calientes 3. 2000-2010

Al analizar el NDVI en este periodo existe un leve decrecimiento de superficie tanto de la clase vegetación como la clase vegetación-agua, ambas a causa del aumento de la superficie de suelo desnudo, lo cual es posible asociar a falta de precipitaciones en la zona. Al analizar el NDWI la clase agua superficial disminuye a causa de la conversión a suelo desnudo, mientras que la clase agua profunda aumenta levemente a causa de la conversión sobre agua superficial. Al aumentar el agua profunda por sobre el agua superficial la vegetación y vegetación-agua disminuye. La clase vegetación-agua es la que se mantiene mayoritariamente para este periodo al igual que la clase agua superficial, por tanto, hay una relación directa entre agua superficial y vegetación-agua.

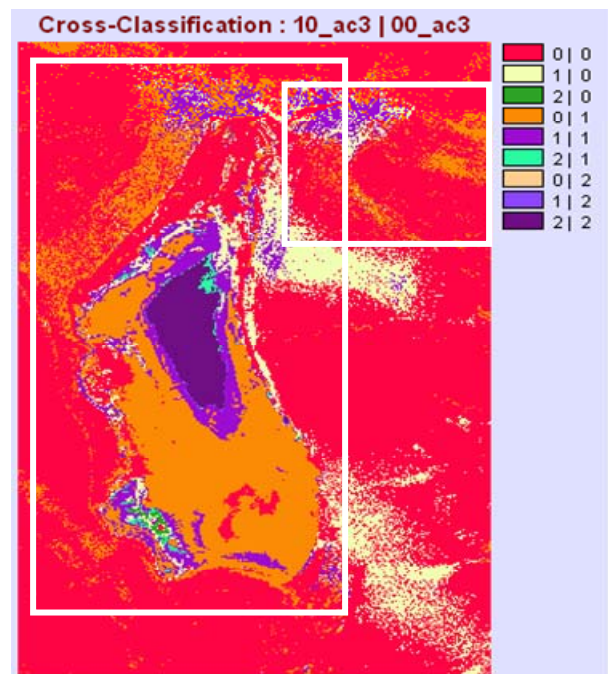
#### Disminución Vegetación y Vegetación-Agua

(0-1 y 0-2)



#### Disminución Agua Superficial

(0-1)

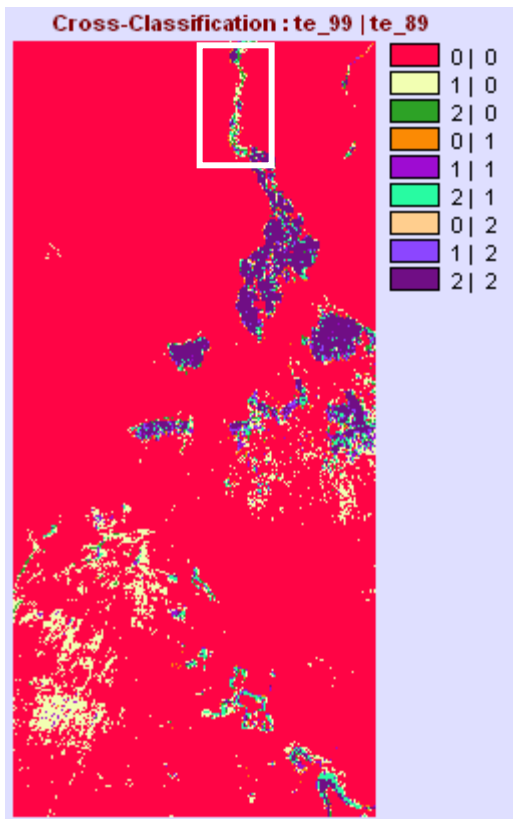


### Vega Tebinquinche 1989-1999

Al analizar el NDVI en este periodo ambas clases de vegetación aumentan, para el caso de la superficie vegetación-agua lo hace por sobre la superficie suelo desnudo, mientras que la clase vegetación lo hace sobre vegetación-agua. Al analizar el NDWI la superficie de la clase agua superficial aumenta excesivamente sobre la superficie suelo desnudo, mientras que la superficie clase agua profunda muestra una leve disminución a causa del aumento de la superficie de la clase agua-superficial. Otra vez más se comprueba que al aumentar la superficie de agua superficial, ambas clases de vegetación se ven beneficiadas. En cuanto al mantenimiento de las clases, la clase vegetación es que se conserva mayoritariamente vinculada a la actividad agrícola localizada en el sector norte del área de estudio; la clase agua superficial es la que se mantiene para el caso de la clasificación agua en el sector noreste y sureste respectivamente.

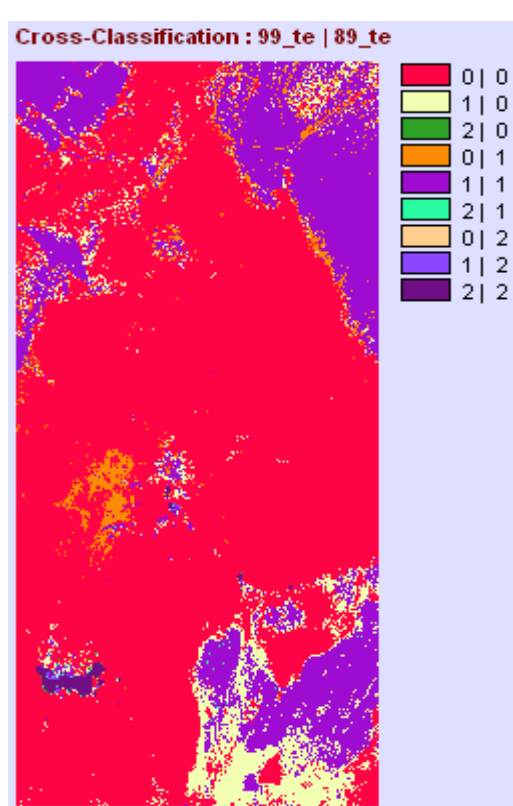
#### Aumento Vegetación y Vegetación –Agua

(1-0 y 2-0)



#### Aumento Agua Superficial

(1-0)

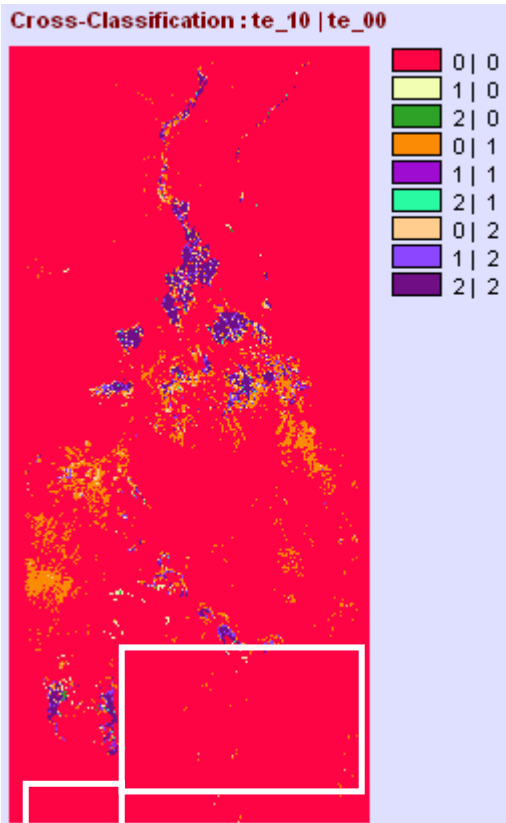


### Vega Tebinquinche 2000-2010

Al analizar los resultados de superficie de NDVI en este periodo, ambas clases de vegetación disminuyen, para el caso de la clase vegetación-agua disminuye drásticamente a causa del aumento de suelo desnudo, mientras que la clase vegetación disminuye moderadamente a causa de la reconversión a vegetación agua y a suelo desnudo. En el caso del NDWI, la clase agua superficial muestra una disminución crítica en el sector sur del área de estudio a causa de la reconversión a suelo desnudo, lo cual denota un periodo más bien seco, mientras que la clase agua profunda también muestra una reducción, más bien moderada, donde también ocurre una reconversión a suelo desnudo en el sector de acumulación de agua de la vega Tebinquinche. Deduciendo por medio de la comparación de superficies se obtiene que durante este periodo se manifiesta una reducción crítica de los niveles de humedad, lo cual incide en la disminución de la categoría vegetación, afectando mayoritariamente a la clase vegetación-agua vinculada a la actividad agrícola presente en el sector norte del área de estudio

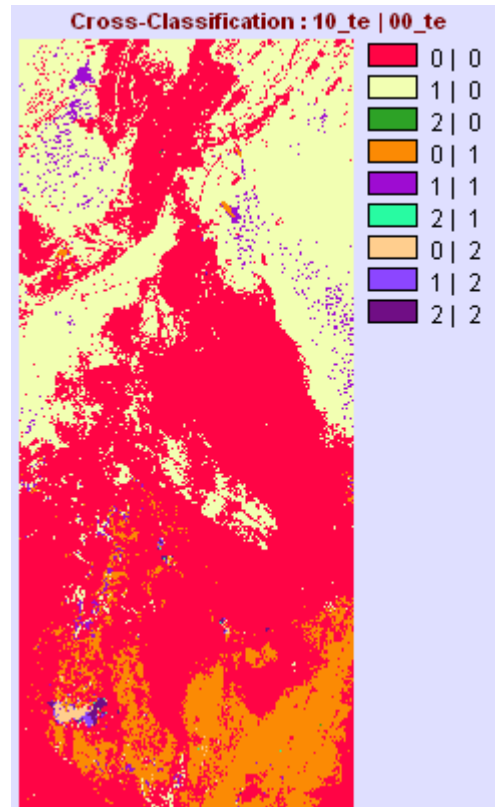
#### Disminución Vegetación y Vegetación-Agua

(0-1; 1-2 y 0-2)



#### Disminución Agua Superficial

(0-1 y 0,2)



En el caso del estudio presentado, tanto la vegetación vigorosa como la vegetación saturada de agua asociada a los humedales de altura presenta una alta dependencia del agua en el suelo, ya que existe una relación directa entre ambas cubiertas, dado que al aumentar una, aumenta la otra y viceversa.