TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN 1
2. ANÁLISIS ENSO 2
2.1. Descripción General 2
2.2. Índices y Regiones ENSO 2
2.3. Evolución Histórica Fenómeno ENSO 3
3. PRECIPITACIÓN 6
3.1. Aspectos Generales 6
3.2. Precipitación a Nivel Regional 6
3.3. Precipitación a Nivel Local 7
4. ANÁLISIS DE CAUDALES EN ESTACIONES DE MONITOREO DE PASCUA LAMA 14
4.1. Aspectos Generales 14
4.2. Series de Caudales 14
4.3. Series de Promedio Anuales 14
4.4. Análisis de Medias Móviles 14
5. VOLUMEN ALMACENADO EN EMBALSE SANTA JUANA 38
6. CONCLUSIONES 40
7. REFERENCIAS 42



Carlos Espinoza C.
Ingeniero Civil, Ph.D.
Representante Legal HIDROMAS

1. INTRODUCCIÓN

En el presente documento se presentan y analizan antecedentes técnicos para evaluar la situación hidrológica de la cuenca del río Huasco, en la cual se emplaza el proyecto Pascua Lama. Este informe tiene por objeto principal, responder el requerimiento realizado en la letra a) de la Carta N° 351 del Servicio de Evaluación Ambiental de la Región de Atacama, en el marco del procedimiento de revisión de la RCA N° 24/2006. En dicha consulta se expresa lo siguiente, "se requiere que el titular presente mayores antecedentes técnicos que justifiquen el cambio natural haciendo referencia técnica al fenómeno de El Niño y su frecuencia evidenciada en la cuenca del río Huasco".

Para efectos de lo anterior, en este estudio se realiza un análisis técnico del sistema hídrico en el cual se encuentra el proyecto Pascua Lama, utilizando un enfoque regional y local, para dar cuenta del comportamiento histórico de las precipitaciones en estaciones cercanas al área de influencia del Proyecto, volúmenes de embalses en la región y de caudales para los ríos de interés.

Entre los aspectos cubiertos en esta revisión se encuentran los siguientes:

- El Niño/Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés).
- Precipitación Local y Regional.
- Análisis de Caudales en Estaciones de Monitoreo de Pascua Lama.

2. ANÁLISIS ENSO

2.1. Descripción General

De acuerdo a SHOA (2003) y DMC (2014), el fenómeno "El Niño Southern Oscillation" (en adelante e indistintamente, "ENSO" o "El Niño") es una perturbación interanual del sistema climático caracterizado por un debilitamiento aperiódico de los vientos alisios y el calentamiento de las capas superficiales en el Océano Pacífico tropical ecuatorial, de esta forma el océano y la atmósfera actúan acopladamente en la cuenca del Pacífico tropical.

La fase cálida que presenta este fenómeno se produce a intervalos irregulares de tiempo (de 2 a 7 años), con un promedio de 3 o 4 años, la cual tiene una duración entre varios meses o más de un año. El elemento climático más afectado por El Niño es la precipitación. De esta manera, durante la ocurrencia de dicho fenómeno, desde la III hasta la VII región del país, se experimenta un considerable aumento en los totales de precipitaciones y en su intensidad.

Por otra parte, "La Niña" es un fenómeno climatológico vinculado con El Niño, pero de un comportamiento opuesto en el Pacífico tropical y la atmósfera. Esta fase se caracteriza por vientos alisios más intensos y temperaturas superficiales del mar más frías que lo normal, en la parte oriental del Pacífico ecuatorial, lo cual provoca que las condiciones de temperatura del aire sean más frías, entre 1 y 2 ºC por debajo del promedio en la costa norte de Chile, cuando La Niña presenta su máxima intensidad. En cambio, la parte sur y austral de Chile, no experimenta grandes cambios desde el punto de vista térmico.

Producto de dicho fenómeno, la precipitación es el elemento climático más afectado. En el país, desde la VIII región (Los Ángeles) al norte, se produce un déficit de lluvias importante que predomina gran parte del año cuando se presenta La Niña. Específicamente, en la región central de Chile, entre la V y la VII Región, se experimenta una disminución de la pluviometría de hasta un 79%.

2.2. Índices y Regiones ENSO

Existen diferentes índices que permiten identificar la ocurrencia de fenómenos El Niño y La Niña (o año Normal), entre ellos se destacan el "Índice Oceánico El Niño (ONI Index)" y el "Índice Multivariado del ENSO (MEI)".

Cada uno estos índices están asociados a las denominadas "Regiones El Niño". De acuerdo a Guevara (2008), estas regiones corresponden a cuatro zonas en el océano Pacífico oriental y central a lo largo de la línea ecuatorial, entre la costa oeste de Sudamérica y el meridiano 180°: Niño 4: Pacífico ecuatorial occidental; Niño 3.4: Pacífico central; Niño 3: Pacífico oriental; Niño 1+2: Pacífico costero.

El índice ONI es el criterio utilizado por el Centro de Predicción Climática del NOAA (NCEP). Este índice se obtiene mediante el promedio móvil de la anomalía de la temperatura de la superficie del mar, en relación con el período de referencia 1971-2000, considerando tres meses sucesivos: la anomalía del mes, la anomalía del mes que le antecede y del mes que le sigue.

En base a este índice, cuantitativamente se entiende que un evento El Niño corresponde a lo menos cinco meses con magnitudes mayores o iguales a 0,5 °C; y un evento La Niña es aquel en que se presente al menos cinco meses con magnitudes menores o iguales a -0,5 °C.

Por su parte, el índice MEI diseñado por Klaus Wolter (1987) de NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center (CDC), es un índice más complejo que permite identificar estos fenómeno climáticos considerando seis variables características: temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire, presión atmosférica al nivel del mar, nubosidad, componente zonal del viento y componente meridional del viento.

De esta manera, el índice MEI corresponde a un promedio ponderado de las variables empleadas en su cálculo, y es obtenido mensualmente para los dos meses precedentes. Durante un evento caliente o Niño, hay sucesión de índices mayores que +0,5, y en la fase fría, una sucesión de MEI menores que -0,5.

2.3. Evolución Histórica Fenómeno ENSO

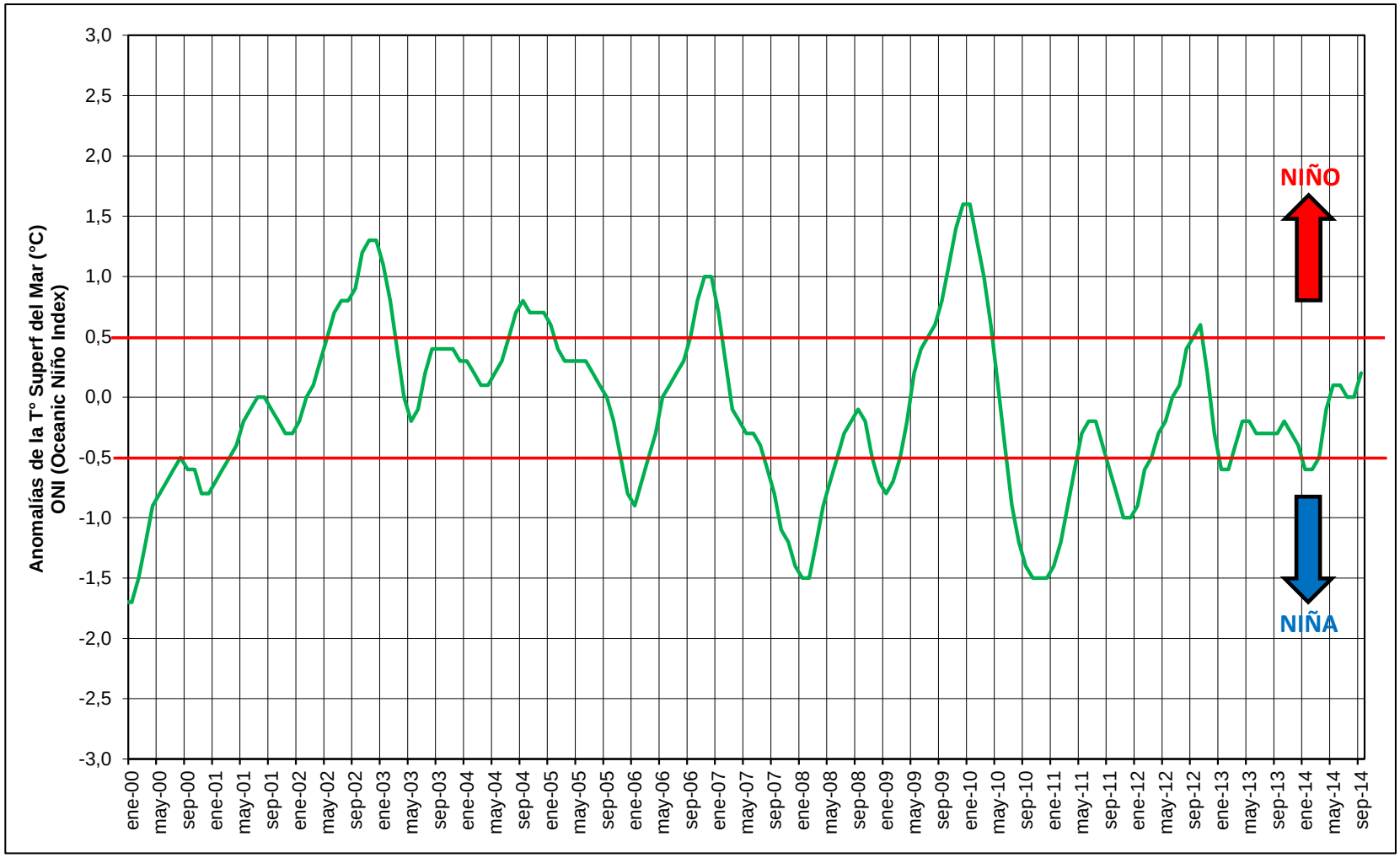
A partir de la información disponible en el Centro de Predicciones Climáticas (CPC) para la región Niño 3.4, se elaboraron dos gráficos (Figuras 2.1 y 2.2) en donde se visualiza la ocurrencia histórica de estos fenómenos. La ocurrencia de años Niño, Niña y Normal, en este caso se basó en las variaciones del Índice Oceánico del Niño (ONI) en un umbral de +/- 0,5°C con respecto a los promedios históricos registrados.

Como se observa en las Figuras 2.1 y 2.2, previo al inicio del proyecto existen dos períodos de mayor importancia en donde se manifestó el fenómeno del Niño, en el segundo semestre del 2002 y en el último tramo del año 2004. El fenómeno de la Niña en cambio tuvo una ocurrencia relevante tanto en el 2000 como en el 2008.

Es importante mencionar que la definición de un período como Niño, Niña o Normal de acuerdo a este índice, constituye una aproximación para el área de estudio, ya que la región para la cual está definida es mucho más amplia. Por lo tanto, el uso de este índice en los análisis que se exponen en este informe es de carácter referencial y no necesariamente refleja o se condice con el comportamiento meteorológico a nivel local.

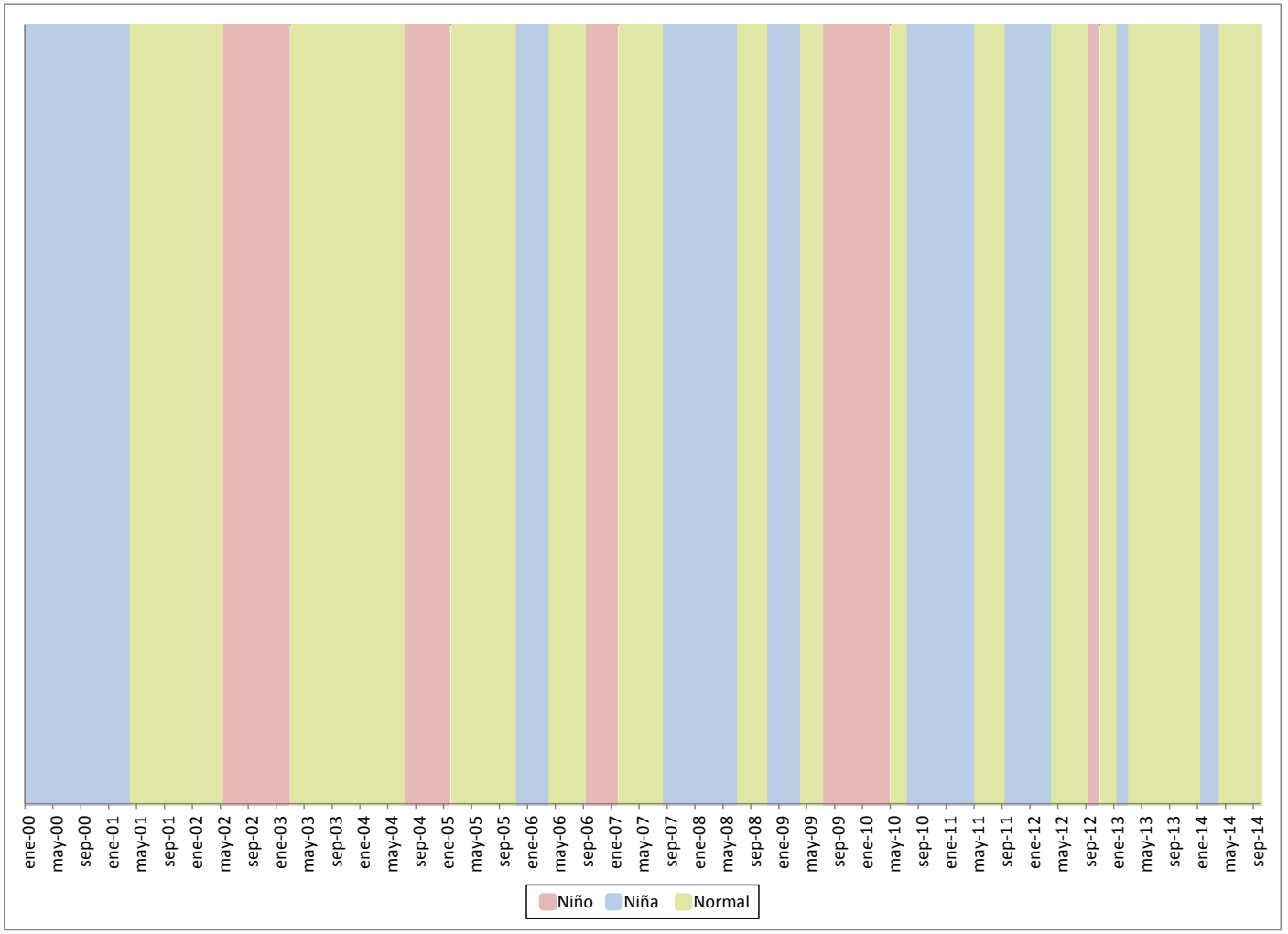
Adicionalmente, en el caso particular del área de estudio, en términos de la precipitación sólo los meses de invierno (abril a agosto) serán “representativos” de una condición Niño, Niña o Normal, ya que usualmente sólo en esos meses se producen eventos de precipitación. De acuerdo a esto, y a lo que se observa en las Figuras 2.1 y 2.2, desde el año 2000 en adelante se podrían considerar como años “Niño”: 2002, 2004 y 2009; siendo sólo el primero el único de magnitud considerable. Los años “Niña” serían: 2000, 2008 y 2010, siendo sólo el primero el único de magnitud considerable. Todo el resto estaría en la categoría de año “Normal”.

Figura 2.1
ENSO desde el Año 2000 a 2014 (basado en índice ONI) – Gráfico de Líneas



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 2.2
ENSO desde el Año 2000 a 2014 (basado en índice ONI) – Gráfico de Barras



Fuente: Elaboración Propia.

3. PRECIPITACIÓN

3.1. Aspectos Generales

En este capítulo se presenta un análisis de la precipitación observada tanto a nivel regional como local, que permite analizar la incidencia del fenómeno ENSO sobre esta variable.

La ubicación de las estaciones utilizadas para este análisis se muestra de forma referencial en la Figura 3.1 y en la Tabla 3.1 se detalla su ubicación y distancia respecto al área del Proyecto.

Tabla 3.1
Estaciones Meteorológicas Utilizadas

Estación	Propietario	UTM E (m)	UTM N (m)	Cota (m s.n.m.)	Distancia AP (km)
Conay	DGA	387.426	6.793.855	1.450	38
Vallenar	DGA	329.658	6.836.251	420	104
Cerro Olivares	DGA	409.339	6.651.865	3.550	106
Barriales	PL	396.382	6.761.692	3.730	4,5

Fuente: Elaboración Propia.

3.2. Precipitación a Nivel Regional

Este análisis regional se basa en los pronósticos de disponibilidad de agua que desarrolla la DGA anualmente (DGA, 2009-2010-2011-2012-2013), los cuales utilizan como base las mediciones históricas de precipitaciones realizadas en las estaciones pluviométricas de la DGA Conay y Vallenar. Para efectos de este análisis se consideró la información recopilada mensualmente desde enero de 2000 hasta diciembre de 2014.

En la Figura 3.2 se presenta la serie de precipitaciones anuales desde el año 2000 para la estación Conay. Se puede observar que en los últimos años los valores registrados se encuentran muy por debajo del promedio histórico (de 61,8 mm/año, correspondiente al periodo 2000 al 2014).

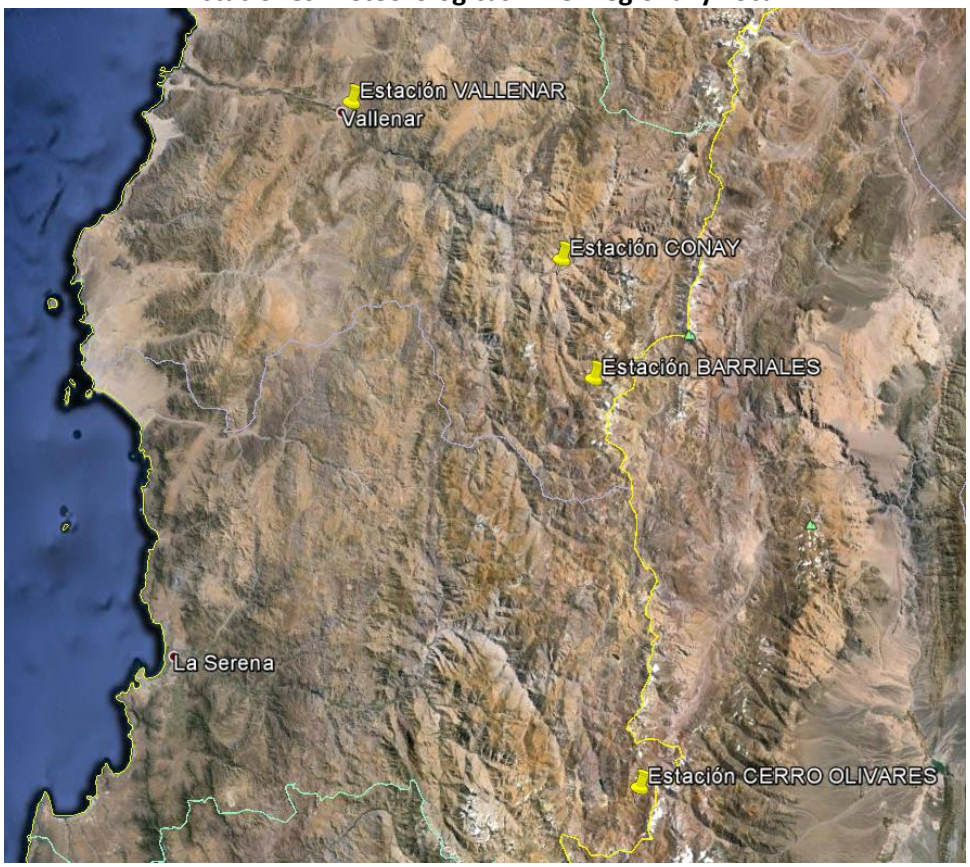
En la Figura 3.3 se presenta la serie de la estación Vallenar, en donde se observa que a partir del 2012, las precipitaciones anuales no superan el promedio histórico (de 30,2 mm/año, correspondiente al periodo 2000 al 2014).

En relación a los años ENSO, se observa en las dos estaciones que el mayor evento de precipitación en las dos estaciones se produjo el año 2002 (año Niño de magnitud considerable), mientras que el año con menor precipitación registrada fue el 2006, el que de acuerdo al índice ONI (considerando los meses invernales) sería un año normal.

Además de la precipitación líquida, se analizó la acumulación de nieve en la región de Coquimbo, en particular en la ruta de nieve Cerro Olivares, ubicada en la cuenca del río Elqui. En la Figura 3.4 se presenta la acumulación máxima por temporada, en su equivalente en agua, y se da cuenta del máximo

valor histórico registrado entre los años 1951 y 1990 (que corresponde a 141 mm, de acuerdo a DGA (2009)).

Figura 3.1
Estaciones Meteorológicas Nivel Regional y Local



Fuente: Elaboración Propia.

Al respecto, se observa que el equivalente en agua de la nieve acumulada en estos últimos años está por debajo de los máximos históricos, siendo el año 2014 el registro con mayor déficit (10 mm), correspondiente a un 93%.

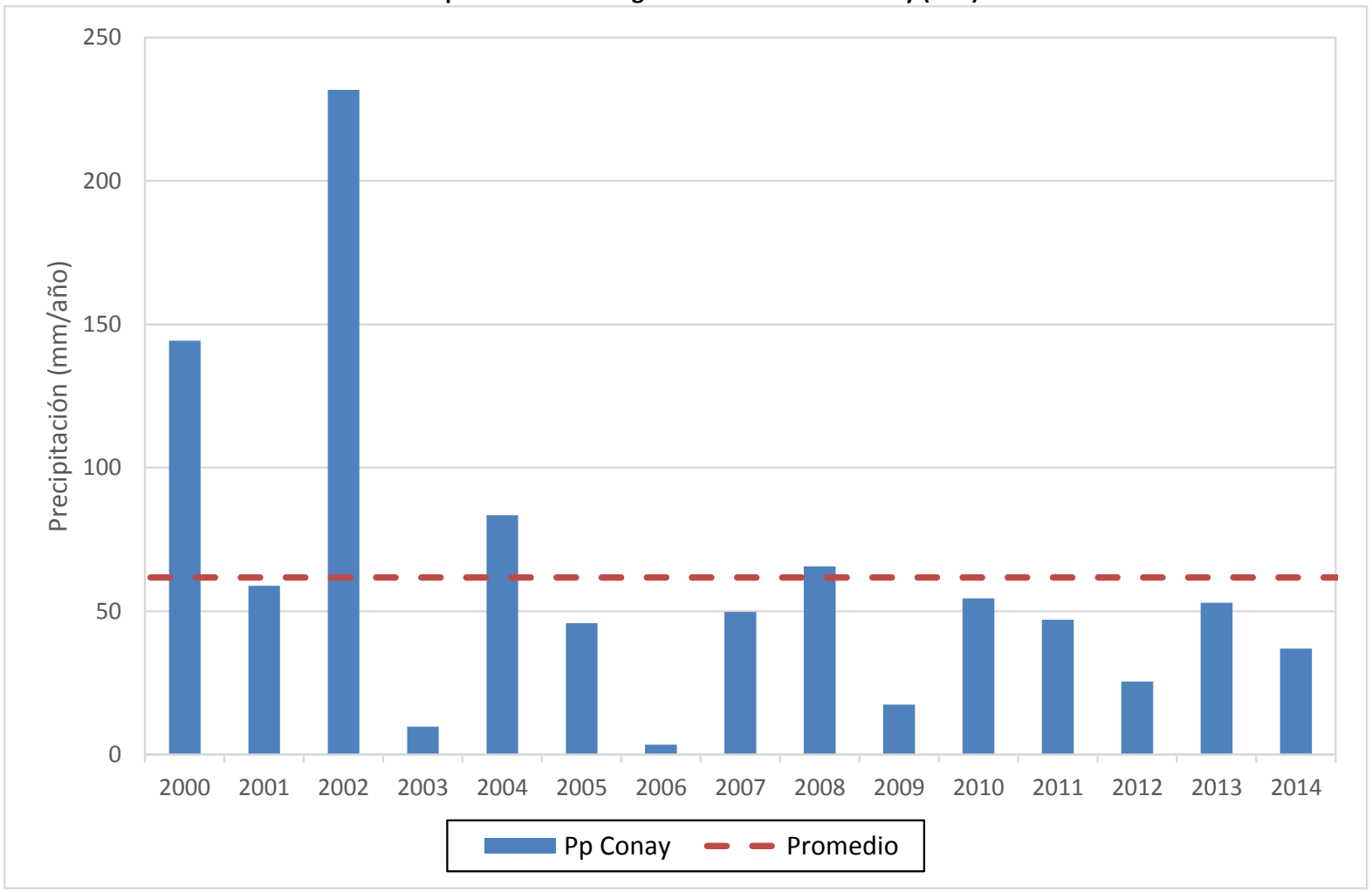
3.3. Precipitación a Nivel Local

En una escala local, se analizó la condición hidrológica mediante la estadística de precipitación nival en la estación Barriales, ubicada en el campamento Pascua Lama.

En la Figura 3.5 se presenta la precipitación nival anual desde el año 2001, en donde se observa un comportamiento relativamente seco en los 6 últimos años, con valores por debajo del promedio histórico de la serie (236,1 mm/año).

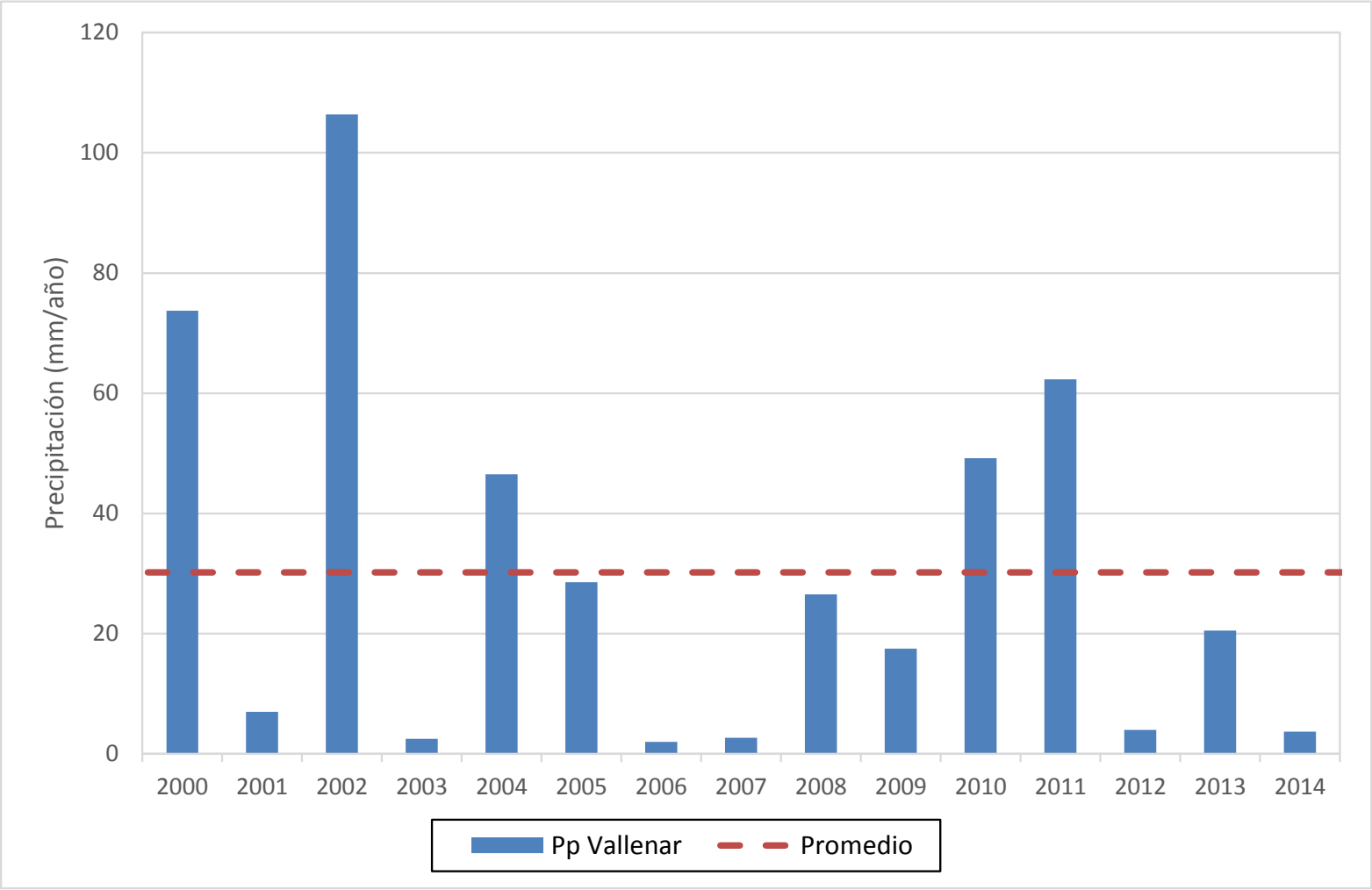
En la Figura 3.6 se muestra la precipitación nival mensual, junto con la evolución del índice ONI. Se aprecia que en relación a los años ENSO, sólo el 2002 las mediciones de precipitaciones se manifestaron de manera consistente con lo indicado por el índice (año Niño de magnitud considerable). A su vez, durante ese año se registró la mayor cantidad de precipitaciones, durante el periodo comprendido entre los años 2000 al 2014. Los otros dos años con mayores registros, 2005 y 2007, son catalogados como años Normales.

Figura 3.2
Precipitación Anual Registrada en Estación Conay (mm)



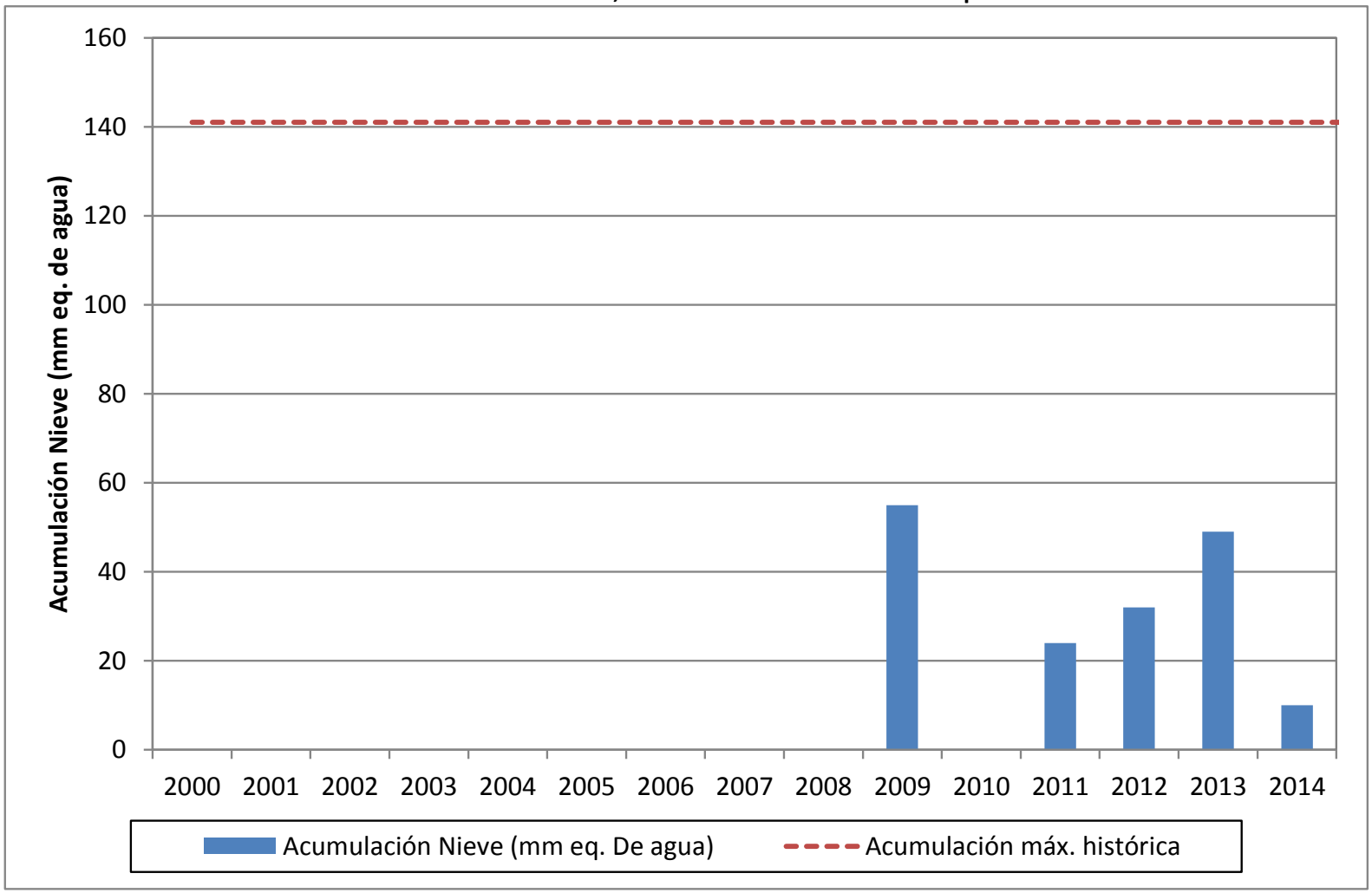
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.3
Precipitación Anual Registrada en Estación Vallenar (mm)



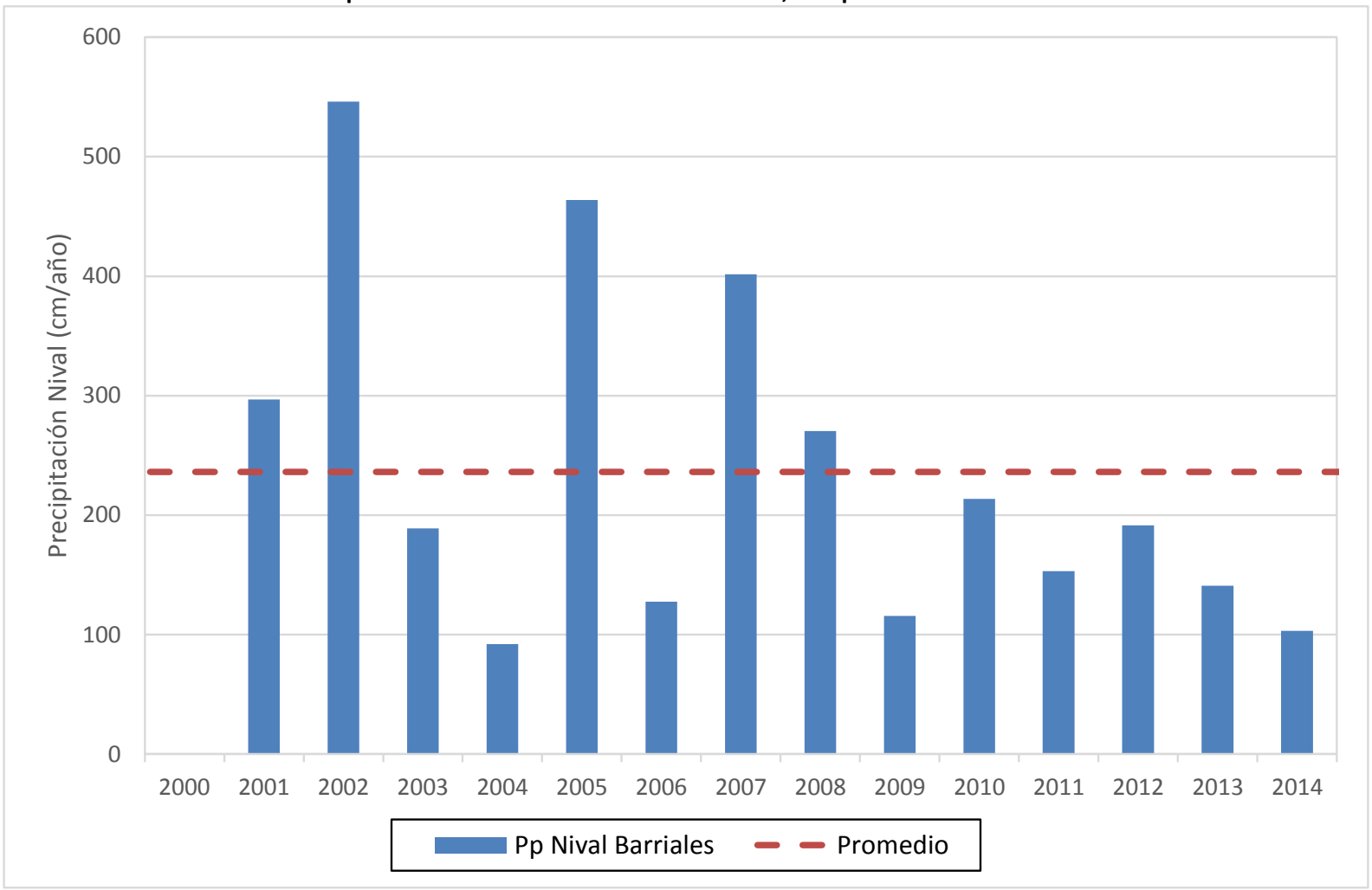
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.4
Acumulación de Nieve, Cerro Olivares Cuenca del río Elqui



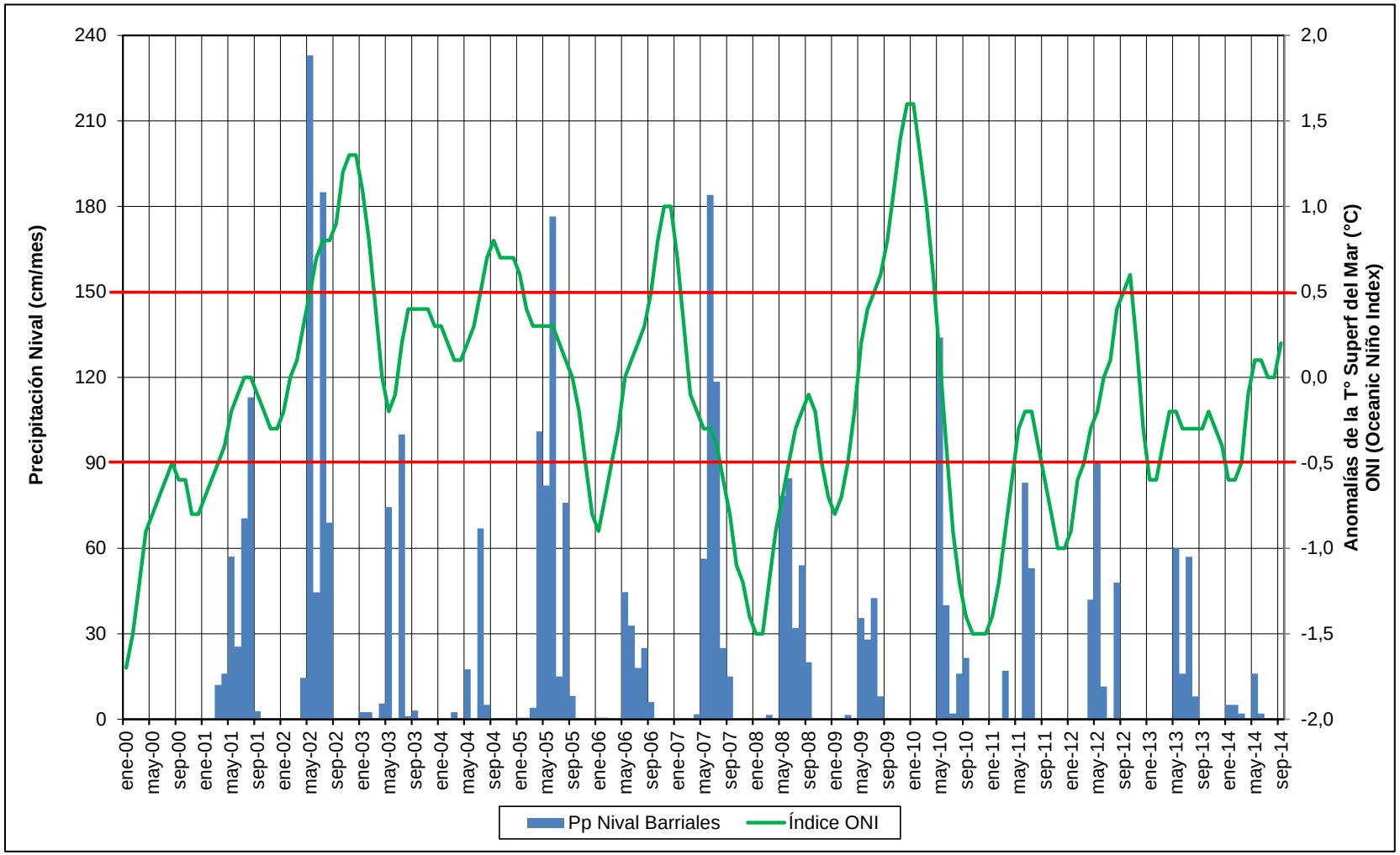
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.5
Precipitación Nival Anual en Estación Barriales, Campamento Pascua Lama



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.6
Precipitación Nival Anual en Estación Barriales, Campamento Pascua Lama



Fuente: Elaboración Propia.

4. ANÁLISIS DE CAUDALES EN ESTACIONES DE MONITOREO DE PASCUA LAMA

4.1. Aspectos Generales

Para analizar la situación de caudales en la zona de interés, y la potencial influencia del fenómeno ENSO en su comportamiento, se utilizó la estadística disponible en las estaciones del río Del Estrecho, en particular en NE-5, NE-2A, NE-3, NE-4 y NE-8. En este análisis se incorporó también la información de caudales de las estaciones NE-1A y NE-7, ubicadas en la Quebrada Barriales y el río Blanco (tributarios al río Estrecho), respectivamente. En la Figura 4.1 se presenta la ubicación esquemática de los puntos en estudio.

4.2. Series de Caudales

A partir de la información disponible se elaboró la serie de caudales en el tiempo para cada estación en estudio. En las Figuras 4.2 a la 4.8 se presentan estas series, en el periodo de tiempo comprendido desde el año 2000 a 2014, señalando la fecha de inicio del proyecto Pascua Lama (octubre de 2009).

Como se observa en las figuras mencionadas, las series de caudales presentan importantes crecidas en los años 2002 y 2006, siguiendo a lo largo del año una variación estacional que se repite en todas las estaciones de estudio, siendo menos dispersa en las estaciones de la parte baja del río Del Estrecho, es decir NE-4 y NE-8.

4.3. Series de Promedio Anuales

A partir de la información histórica de caudales, se calculó la serie de promedios del período de deshielo, comprendido entre los meses de octubre a marzo.

De las Figuras 4.9 a la 4.15 se presentan las series promediadas por año hidrológico, desde el período 2000-2001, además se incluye la serie del promedio en este mismo período.

En las figuras mencionadas se observa que mediante promedios de años hidrológicos, no es posible identificar una tendencia clara de los datos, con valores por sobre el promedio, los que están asociados a crecidas importantes en la zona, provocadas por el deshielo.

4.4. Análisis de Medias Móviles

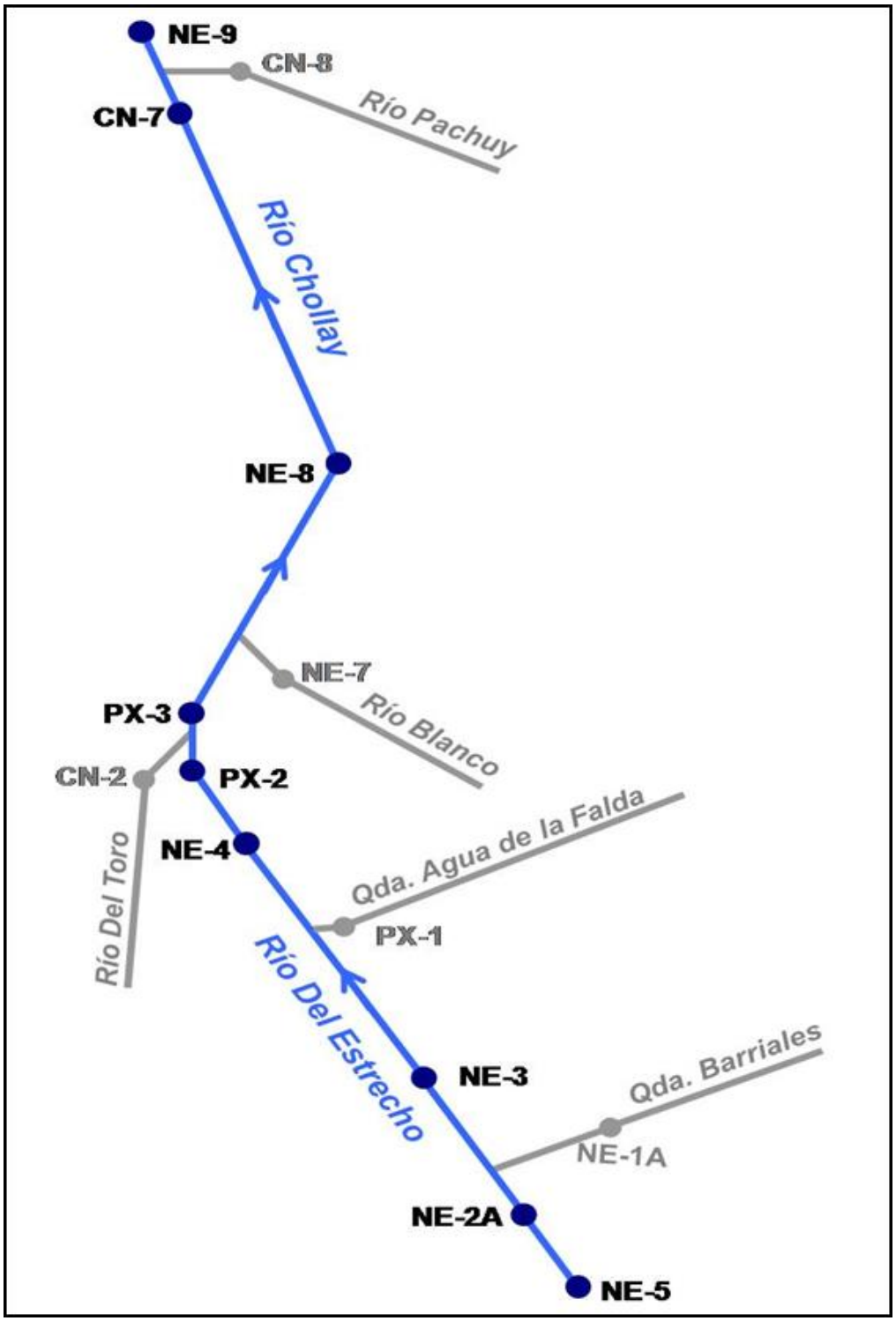
Para visualizar la serie de caudales de mejor manera, se utilizaron medias móviles, que consiste en que cada dato corresponde al promedio de los últimos 12 meses con información. Permitiendo observar los aumentos y disminuciones de caudal y cómo se traduce esto en la tendencia que posee la serie.

De las Figuras 4.16 a la 4.22 se presentan las series de caudales con medias móviles, con el inicio del proyecto, correspondiente al mes de octubre del año 2009, también representado.

A partir del análisis de medias móviles, se observa que la serie de caudal presenta un comportamiento general que indica una disminución de los valores a través del tiempo (hasta antes del inicio de

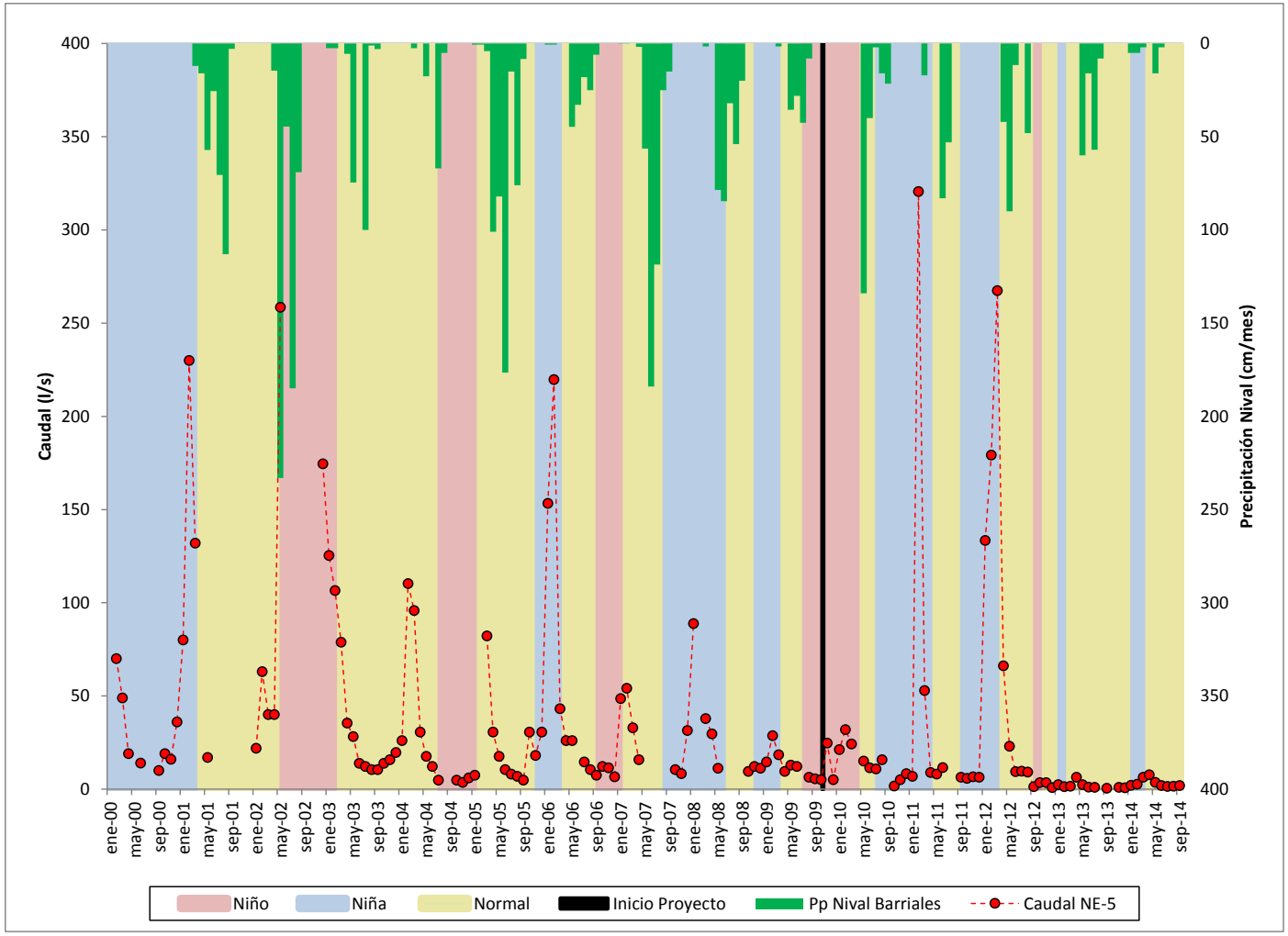
proyecto), con subidas y bajadas marcadas por las temporadas muy secas o húmedas según corresponda. Es importante recordar que en esta cuenca, durante los meses de verano se tiene un efecto combinado sobre los caudales superficial, con aporte de glaciares (que responden a efectos de temperatura para su derretimiento) y de nieve (que es un efecto combinado de precipitación nival más temperatura para su derretimiento).

Figura 4.1
Ubicación Estaciones con Información Fluviométrica



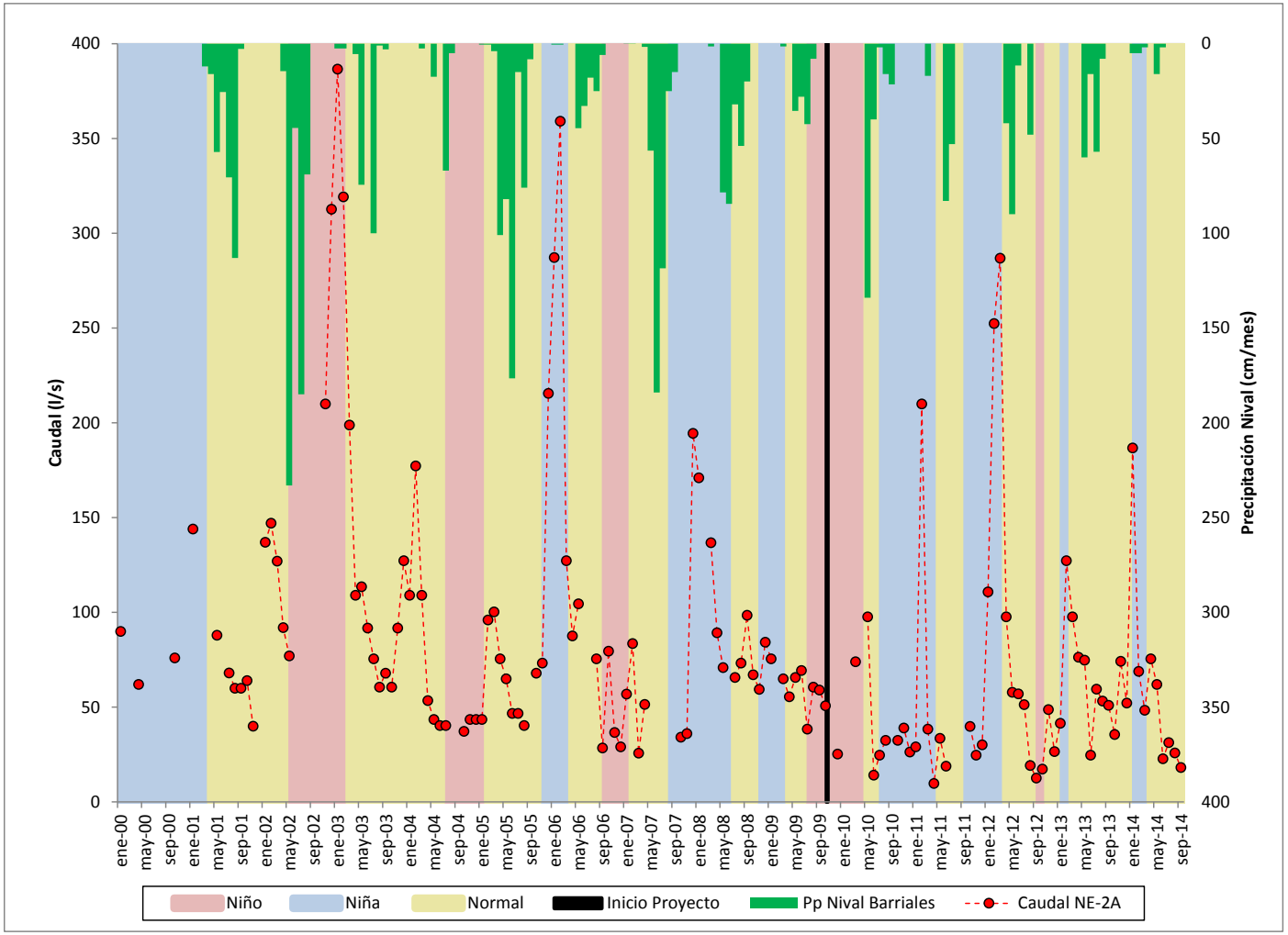
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.2
Serie de Caudales Históricos en NE-5



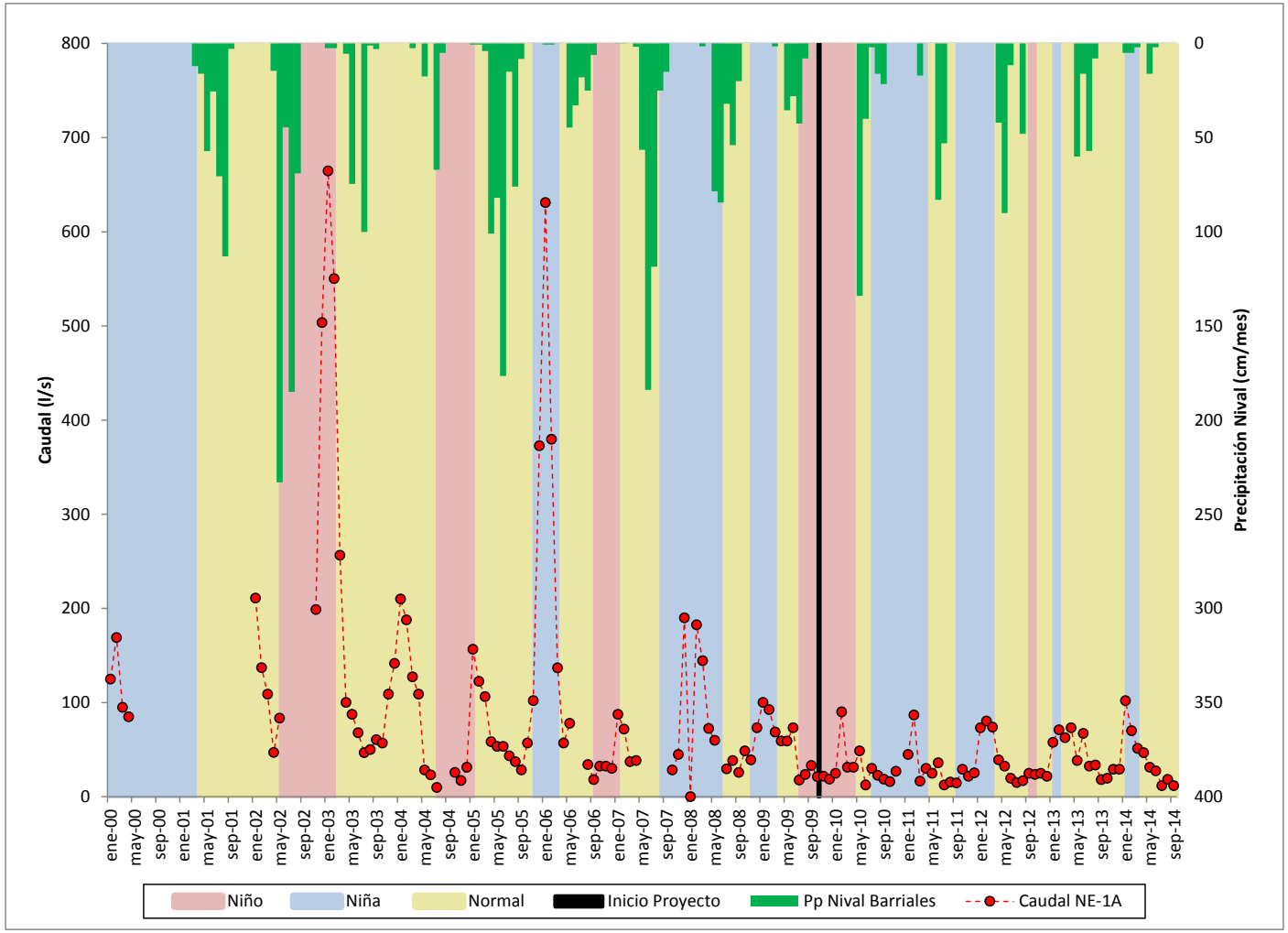
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.3
Serie de Caudales Históricos en NE-2A



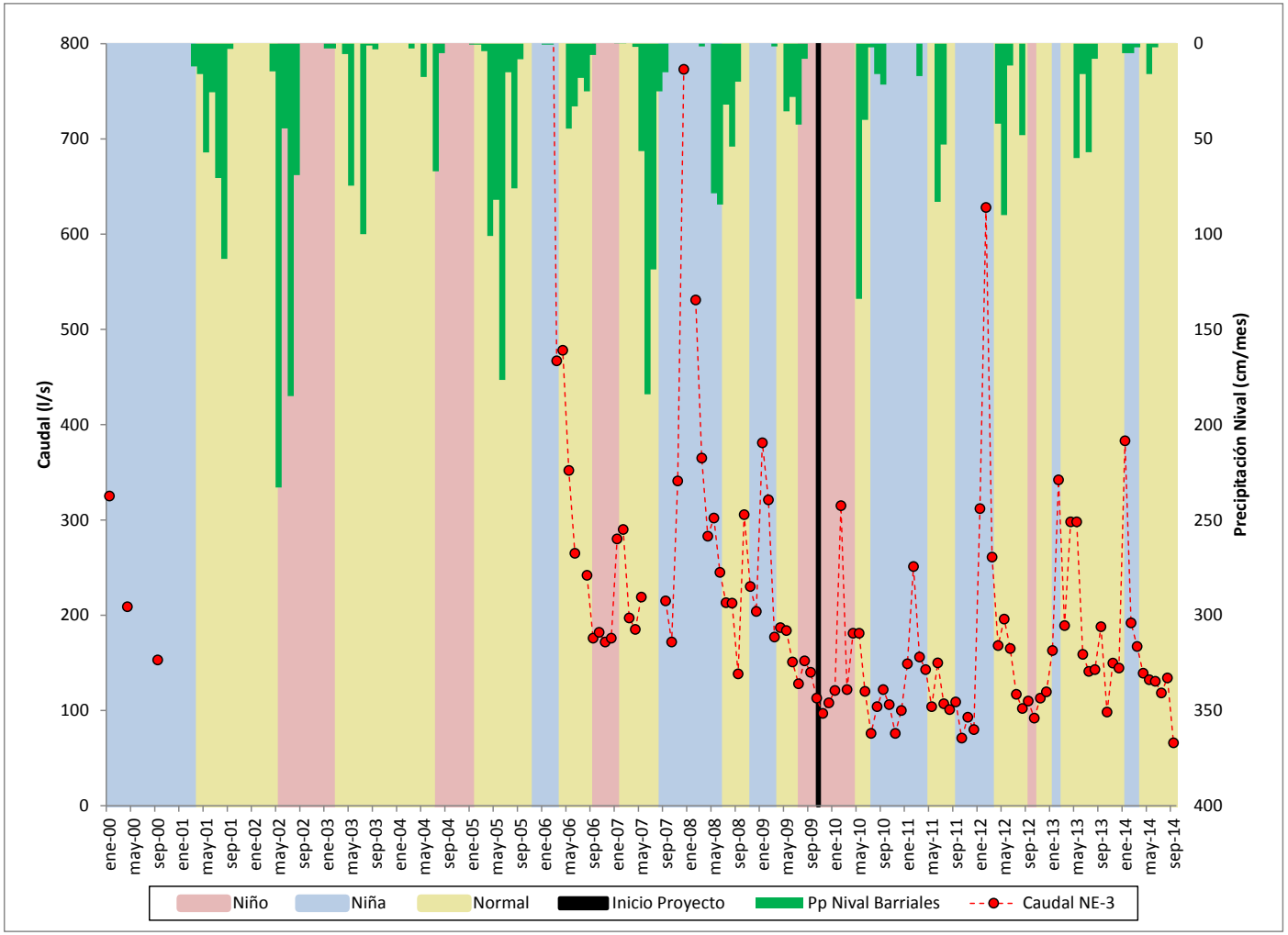
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.4
Serie de Caudales Históricos en NE-1A



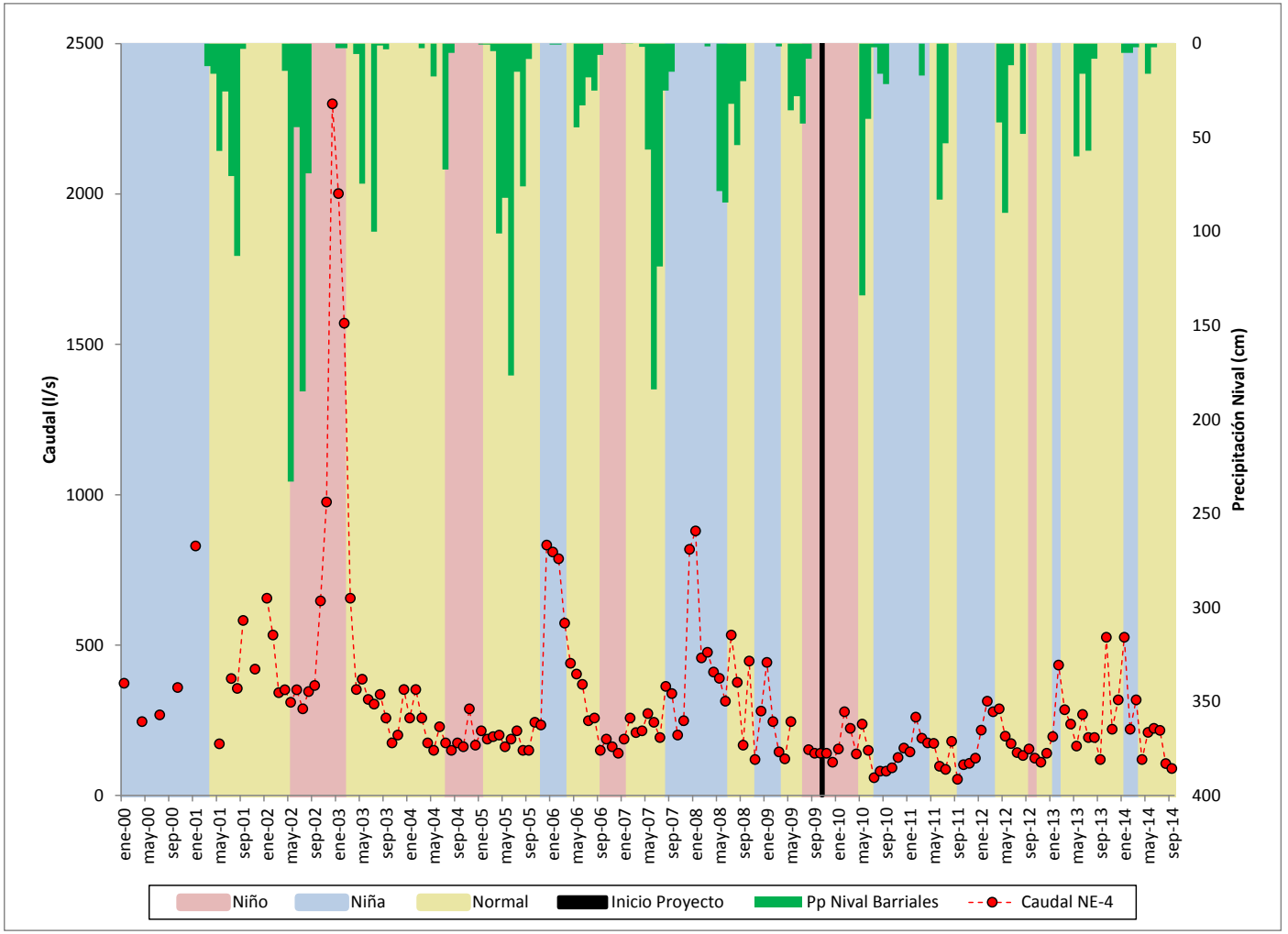
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.5
Serie de Caudales Históricos en NE-3



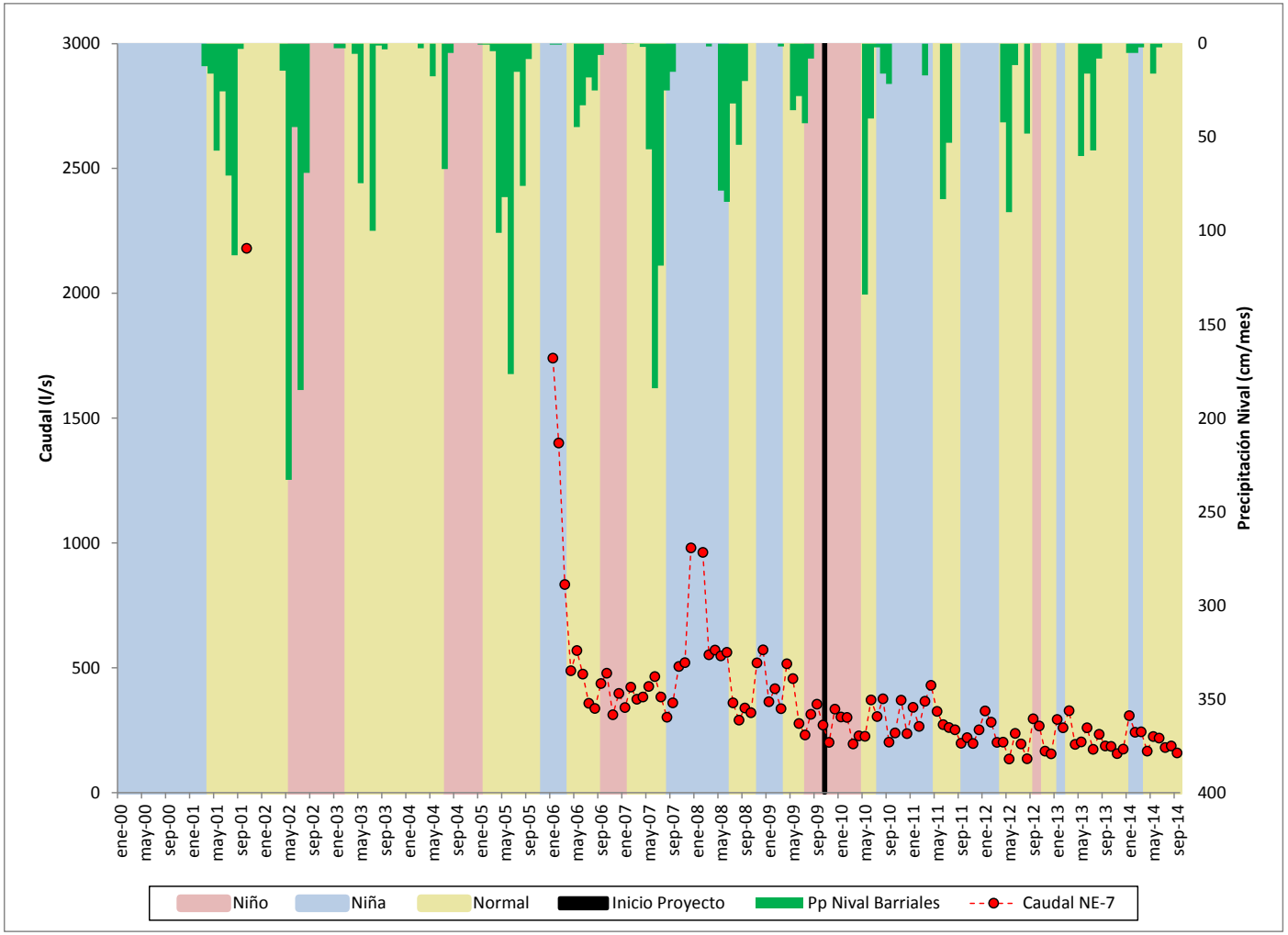
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.6
Serie de Caudales Históricos en NE-4



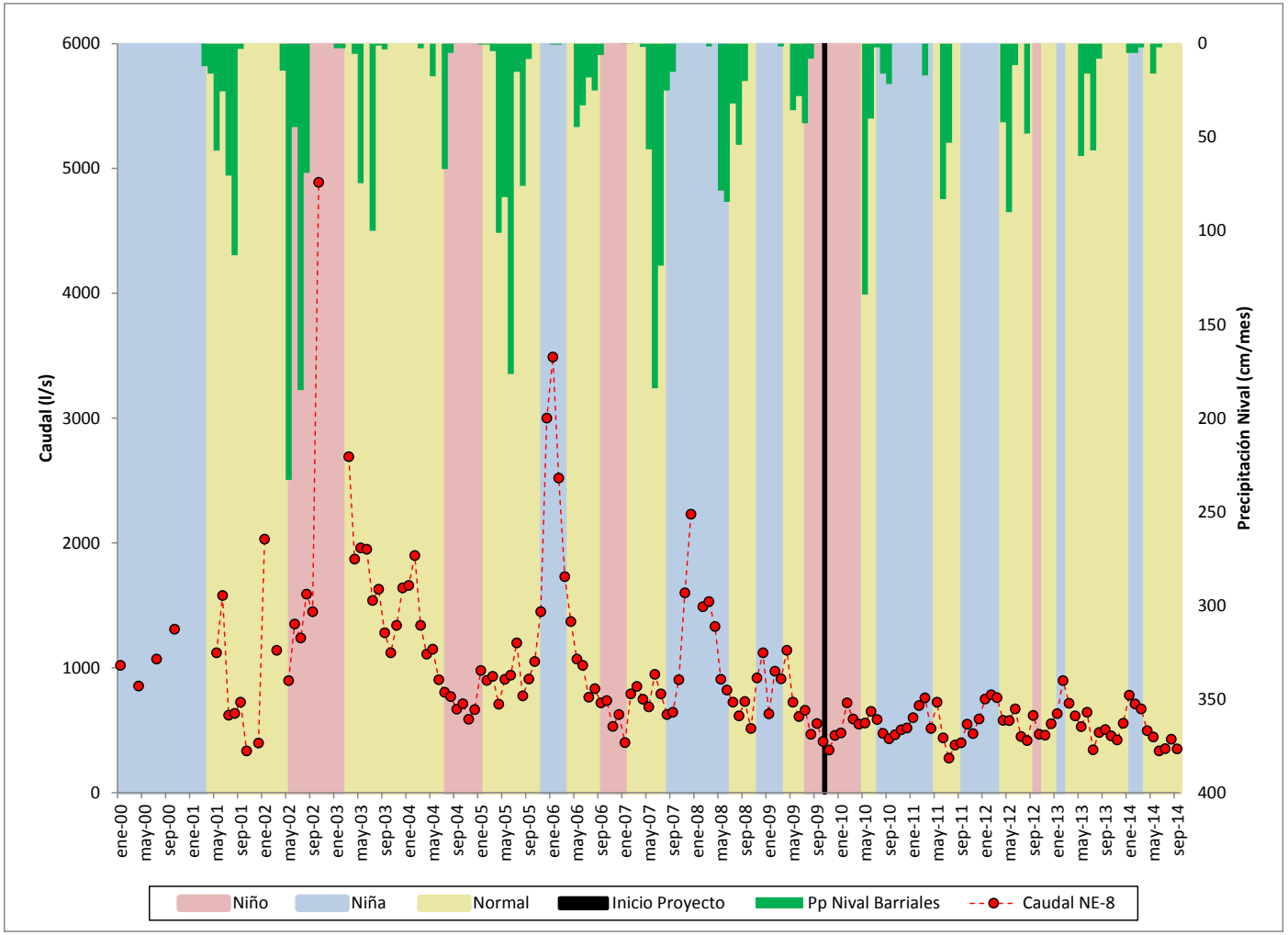
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.7
Serie de Caudales Históricos en NE-7



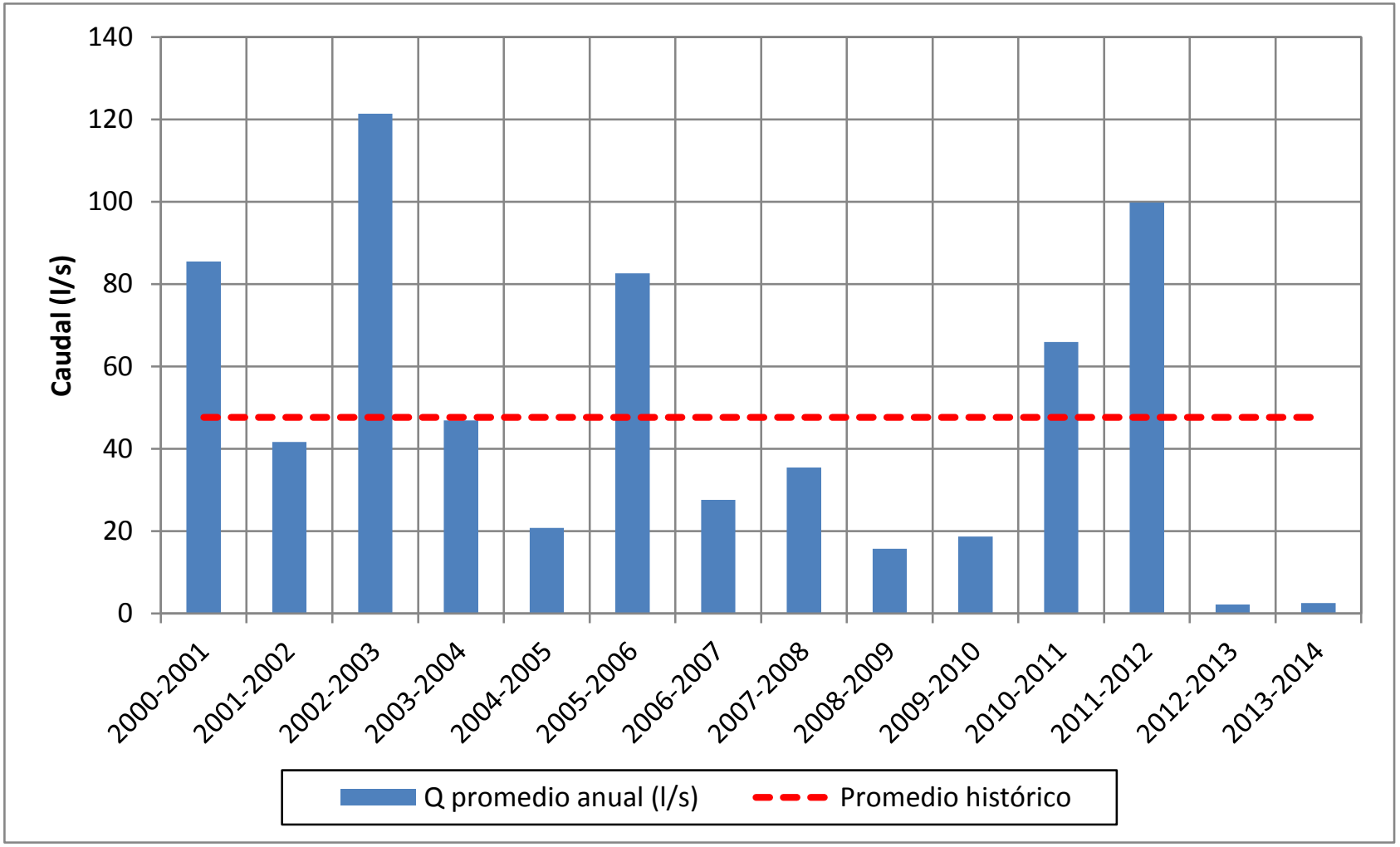
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.8
Serie de Caudales Históricos en NE-8



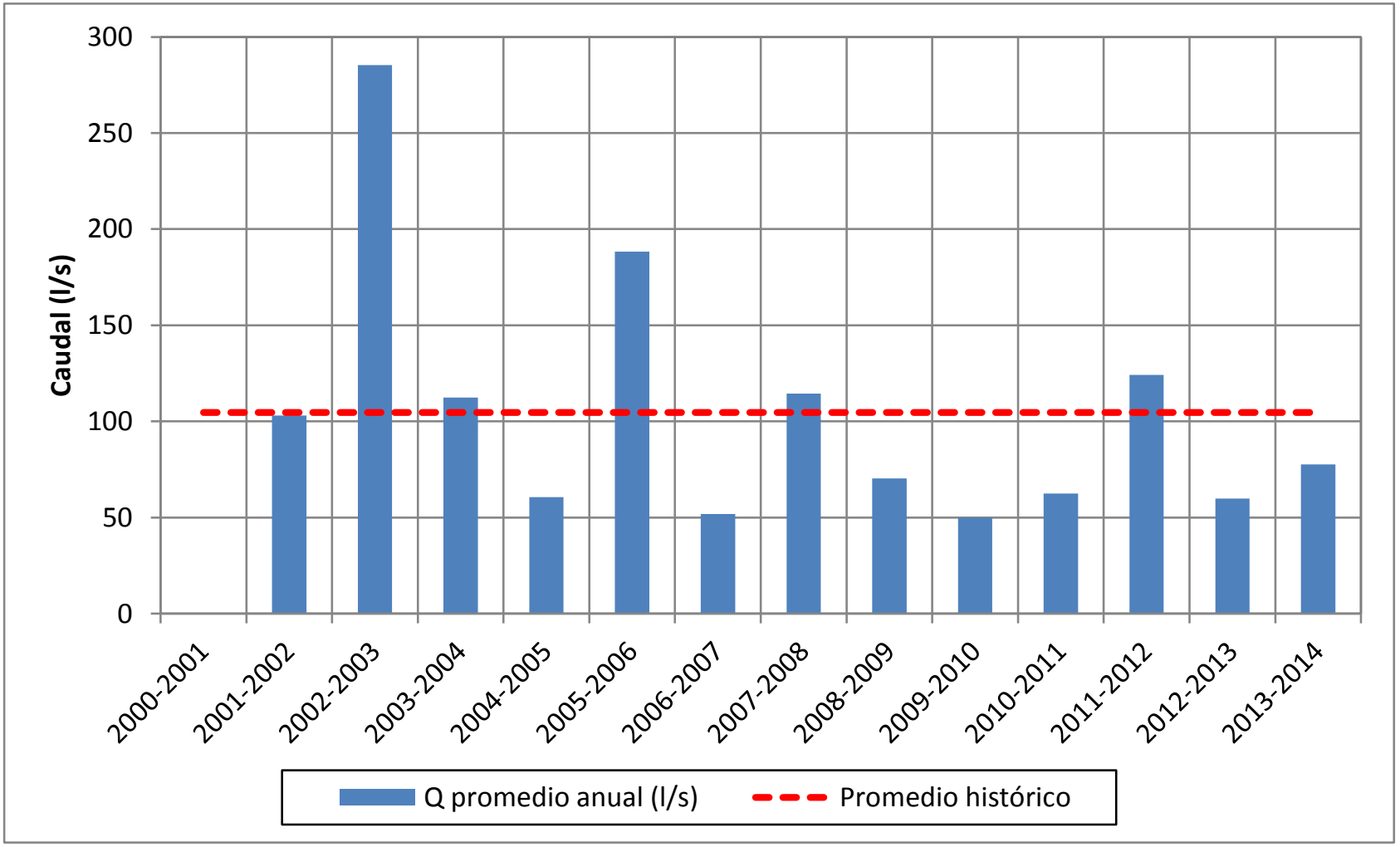
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.9
Serie de Promedios Anuales de Caudales en NE-5



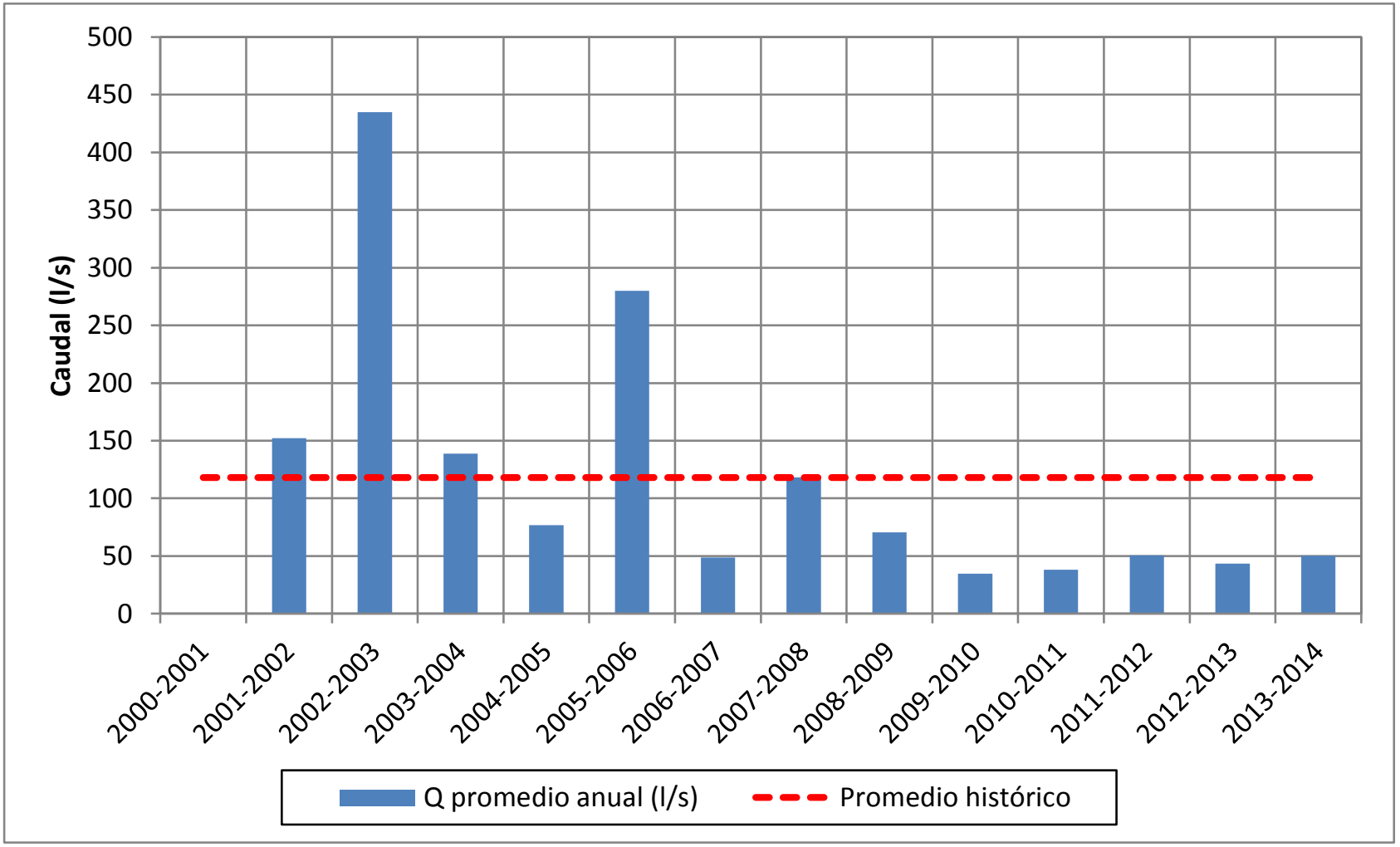
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.10
Serie de Promedios Anuales de Caudales en NE-2A



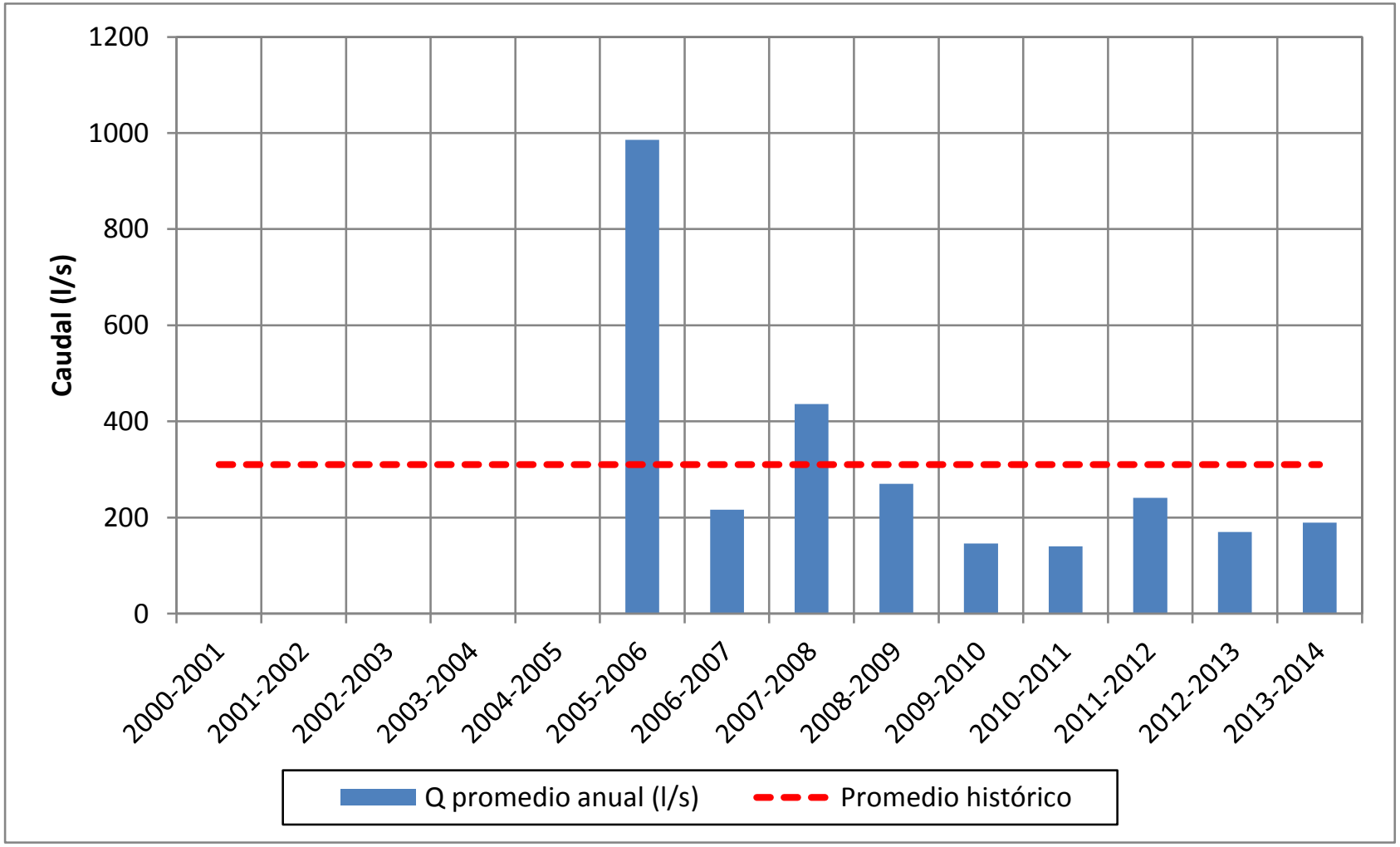
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.11
Serie de Promedios Anuales de Caudales en NE-1A



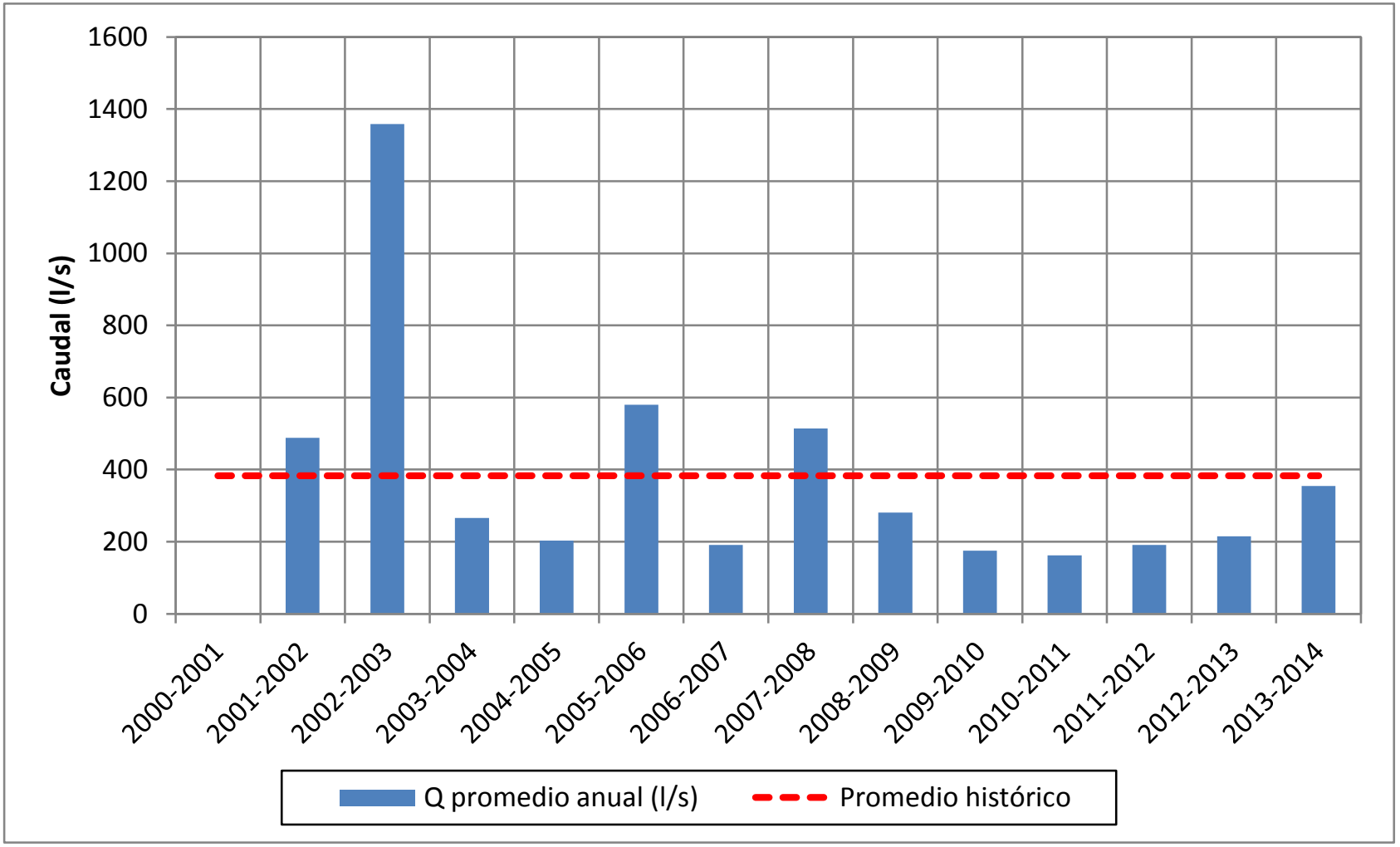
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.12
Serie de Promedios Anuales de Caudales en NE-3



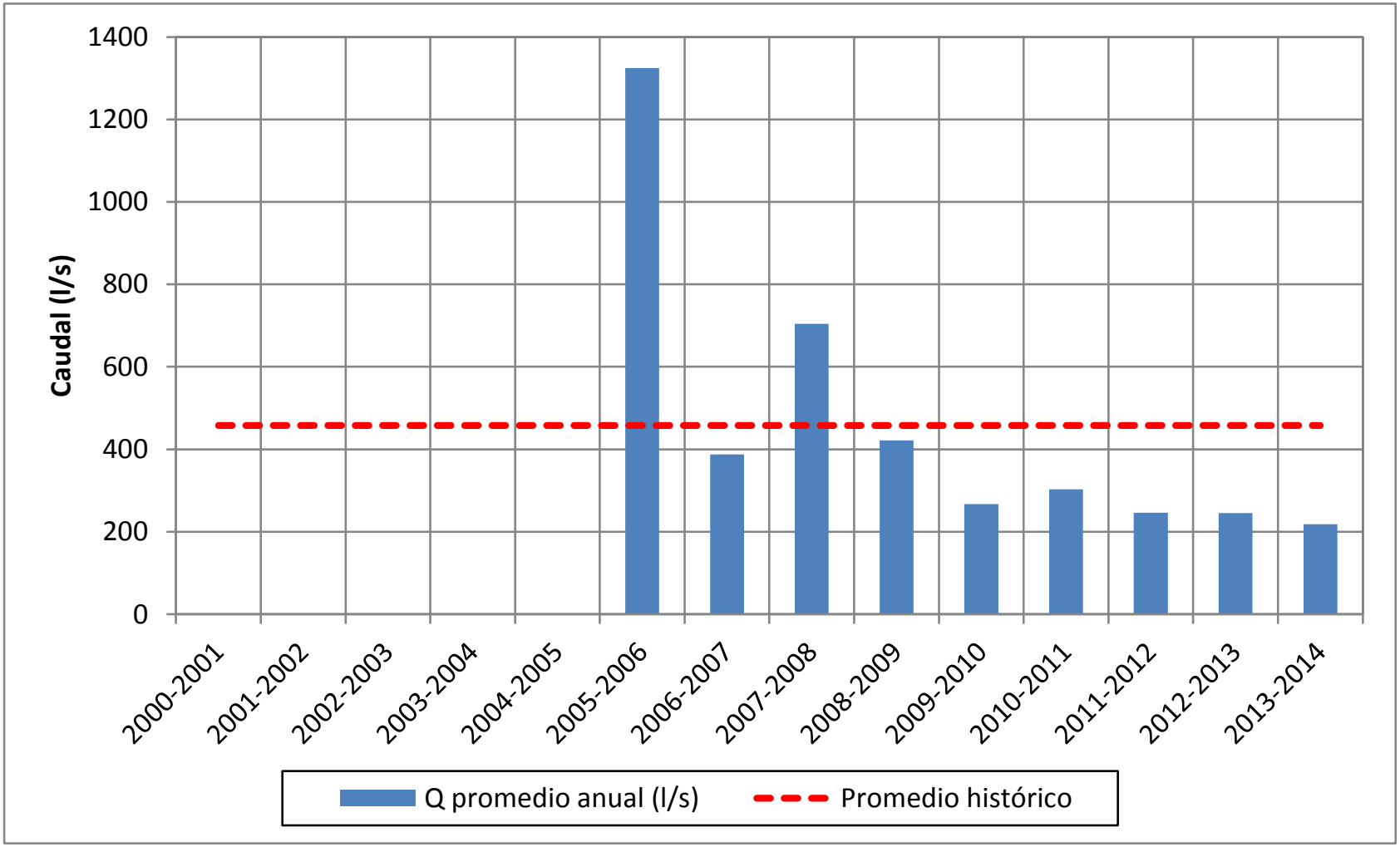
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.13
Serie de Promedios Anuales de Caudales en NE-4



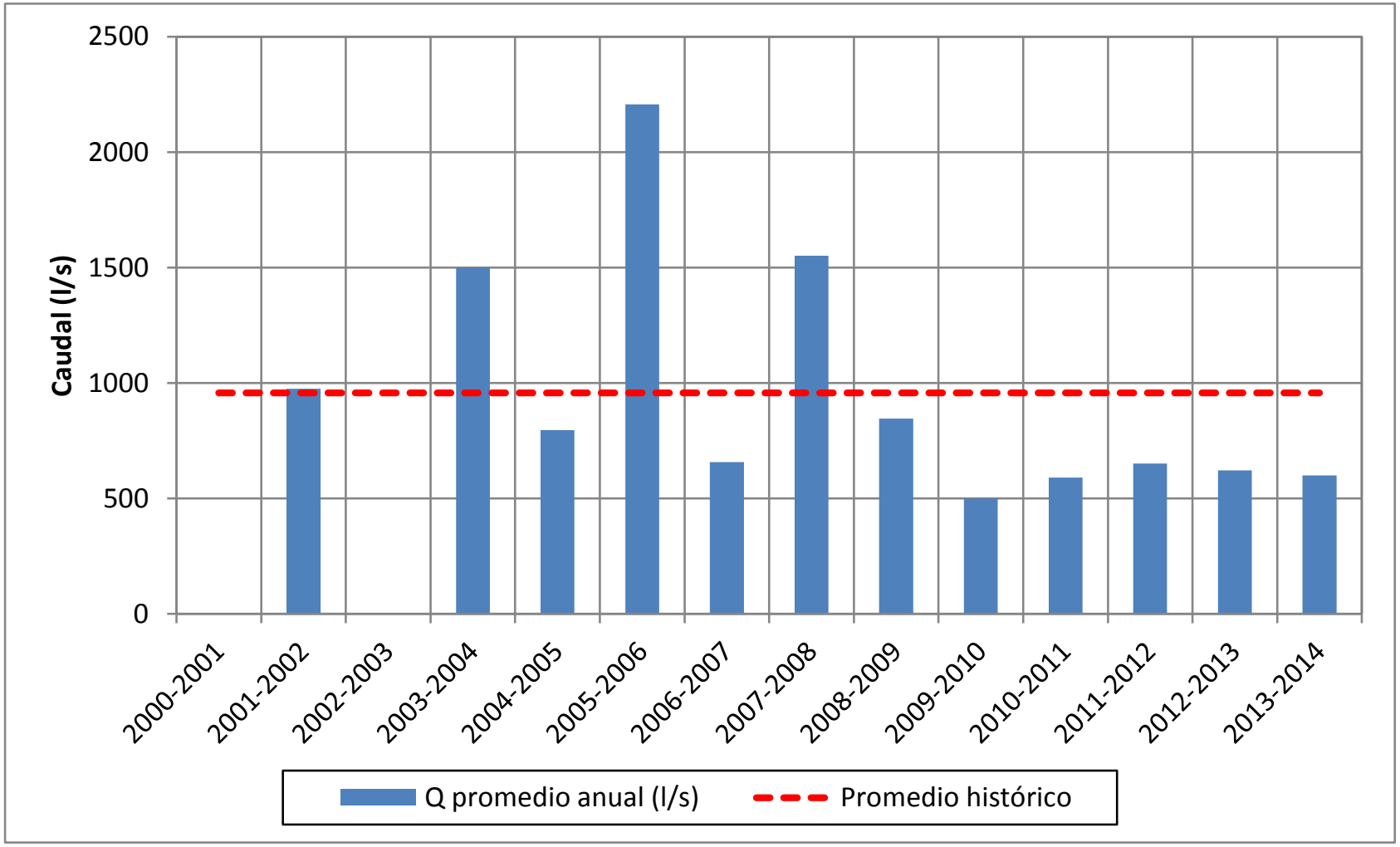
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.14
Serie de Promedios Anuales de Caudales en NE-7



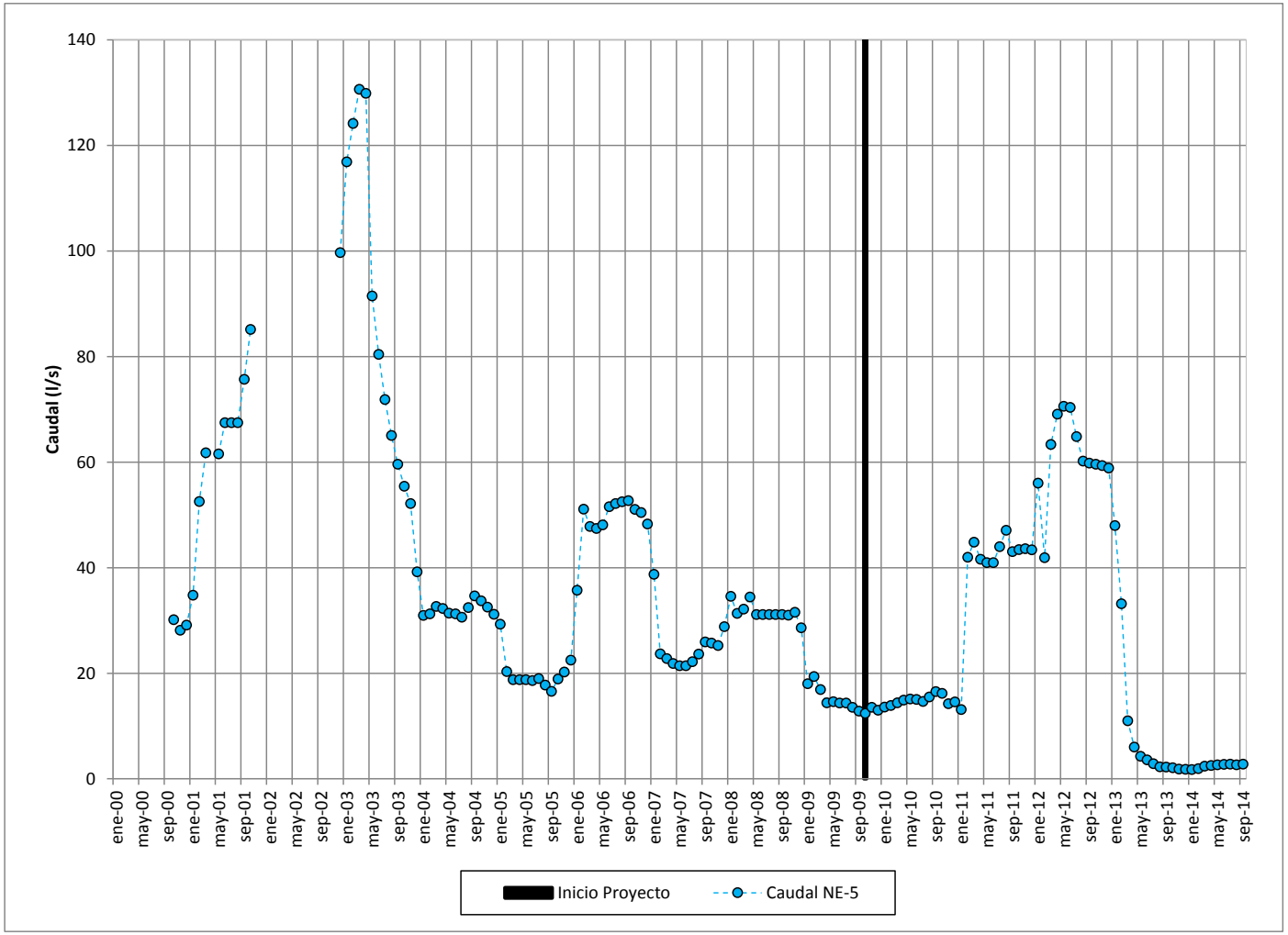
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.15
Serie de Promedios Anuales de Caudales en NE-8



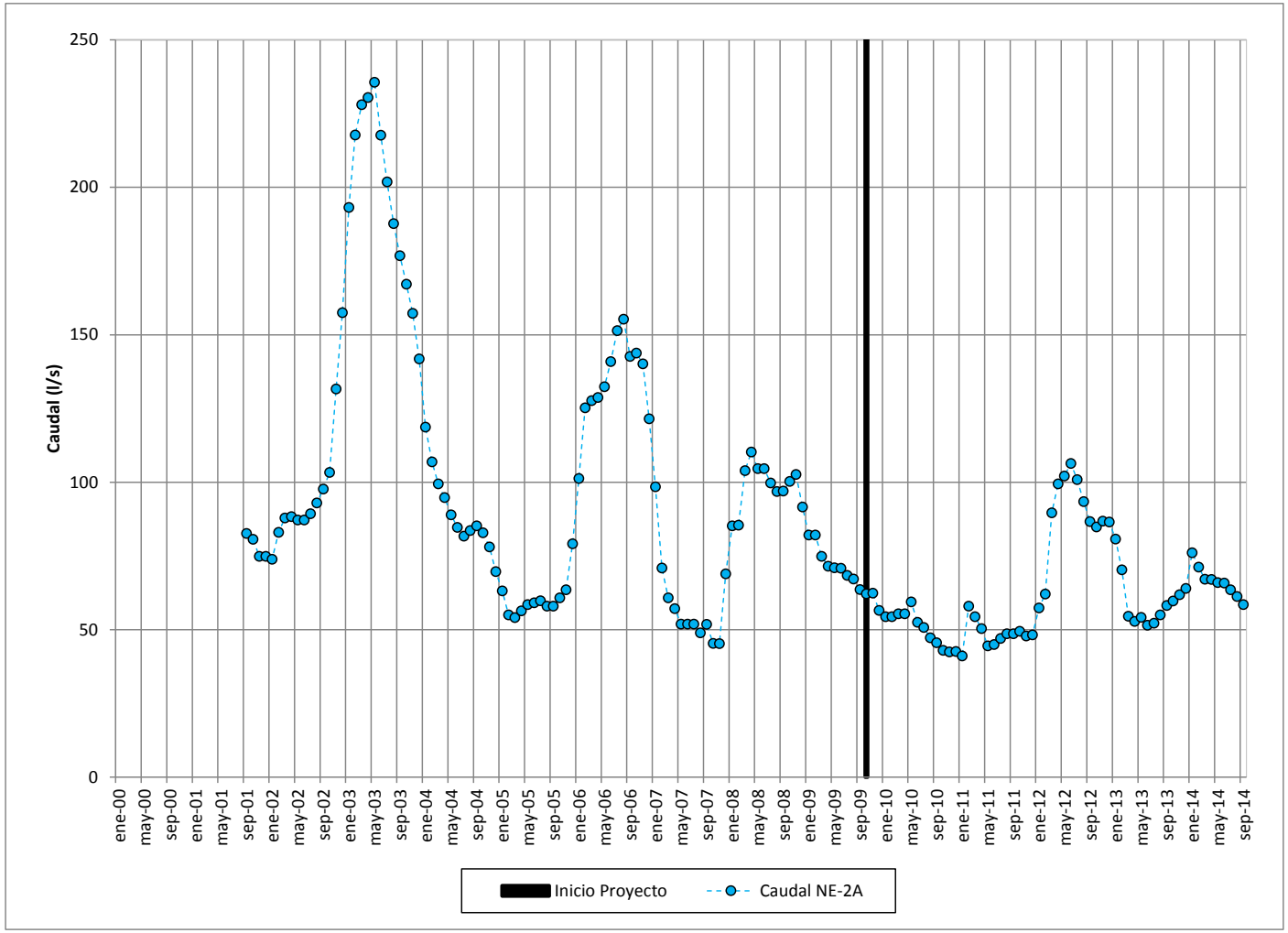
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.16
Serie de Medias Móviles de Caudales en NE-5



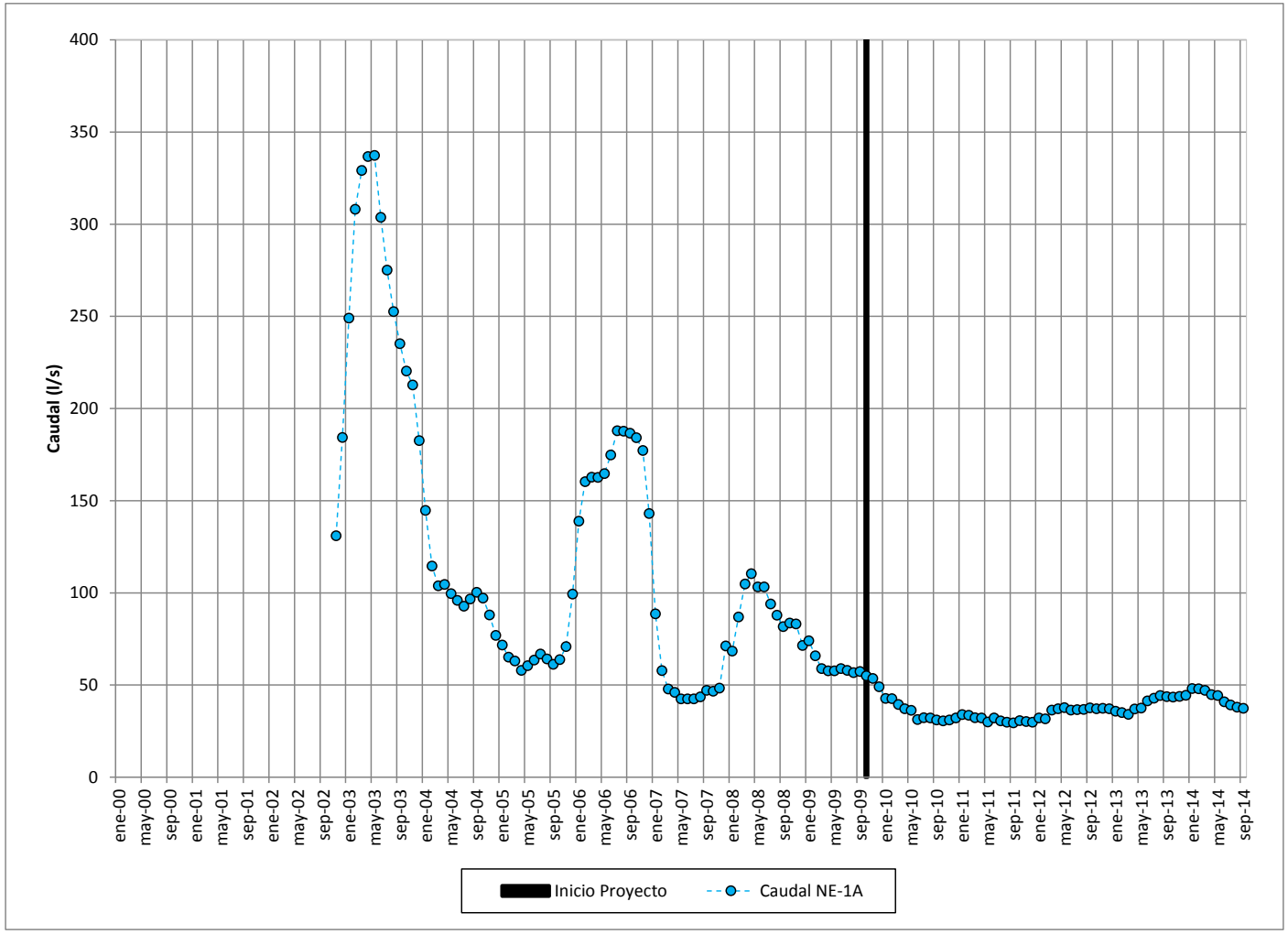
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.17
Serie de Medias Móviles de Caudales en NE-2A



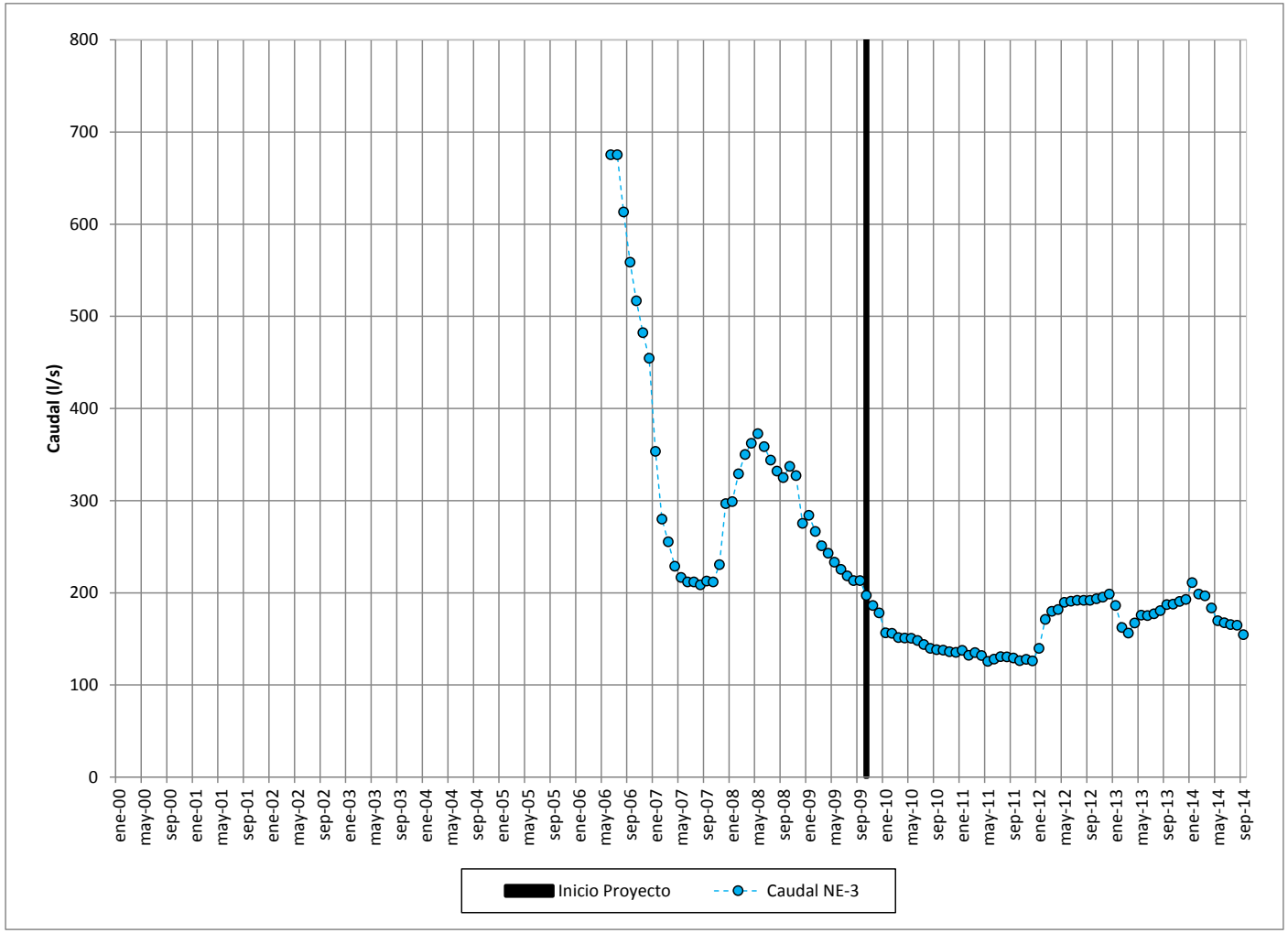
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.18
Serie de Medias Móviles de Caudales en NE-1A



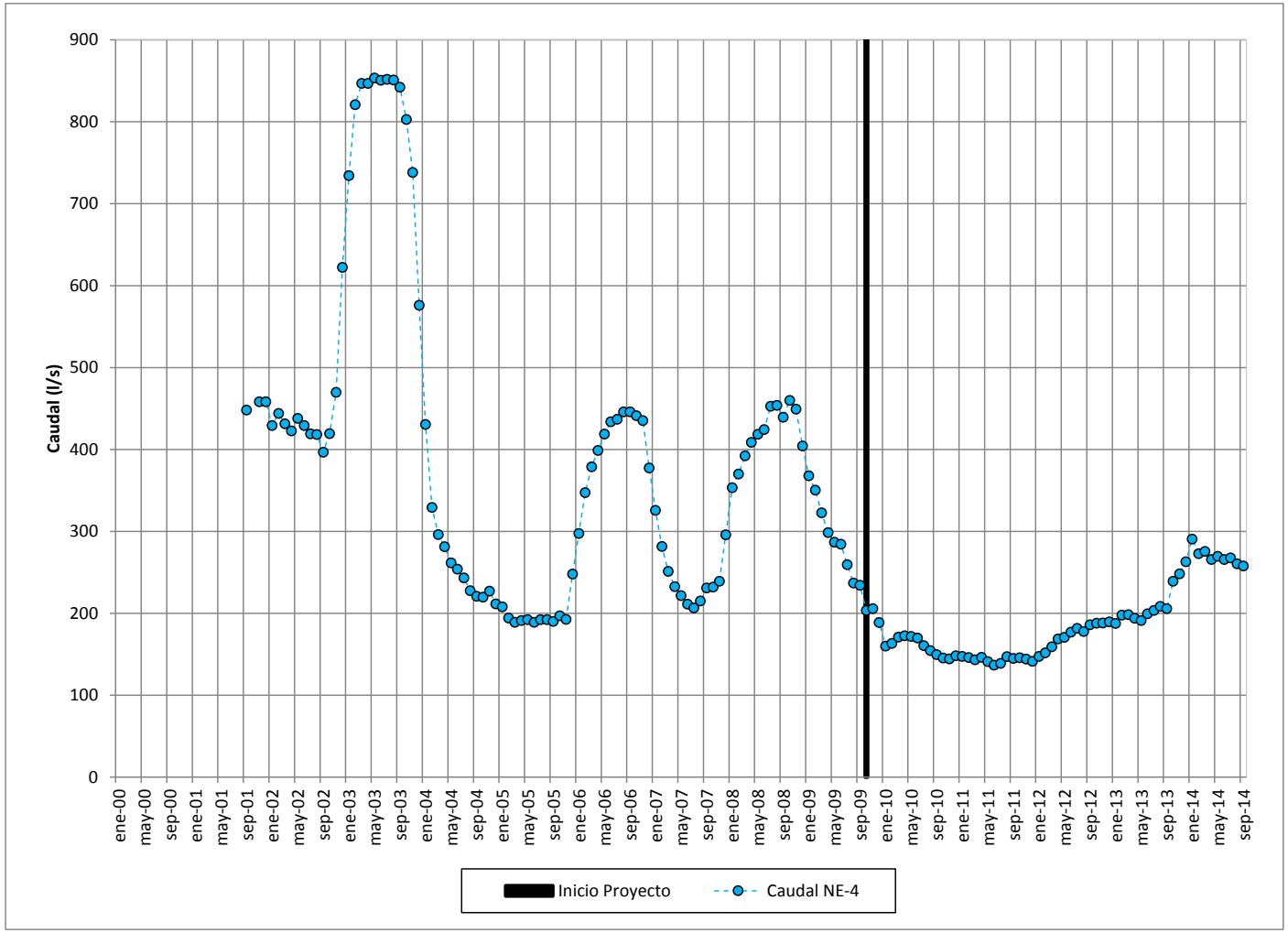
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.19
Serie de Medias Móviles de Caudales en NE-3



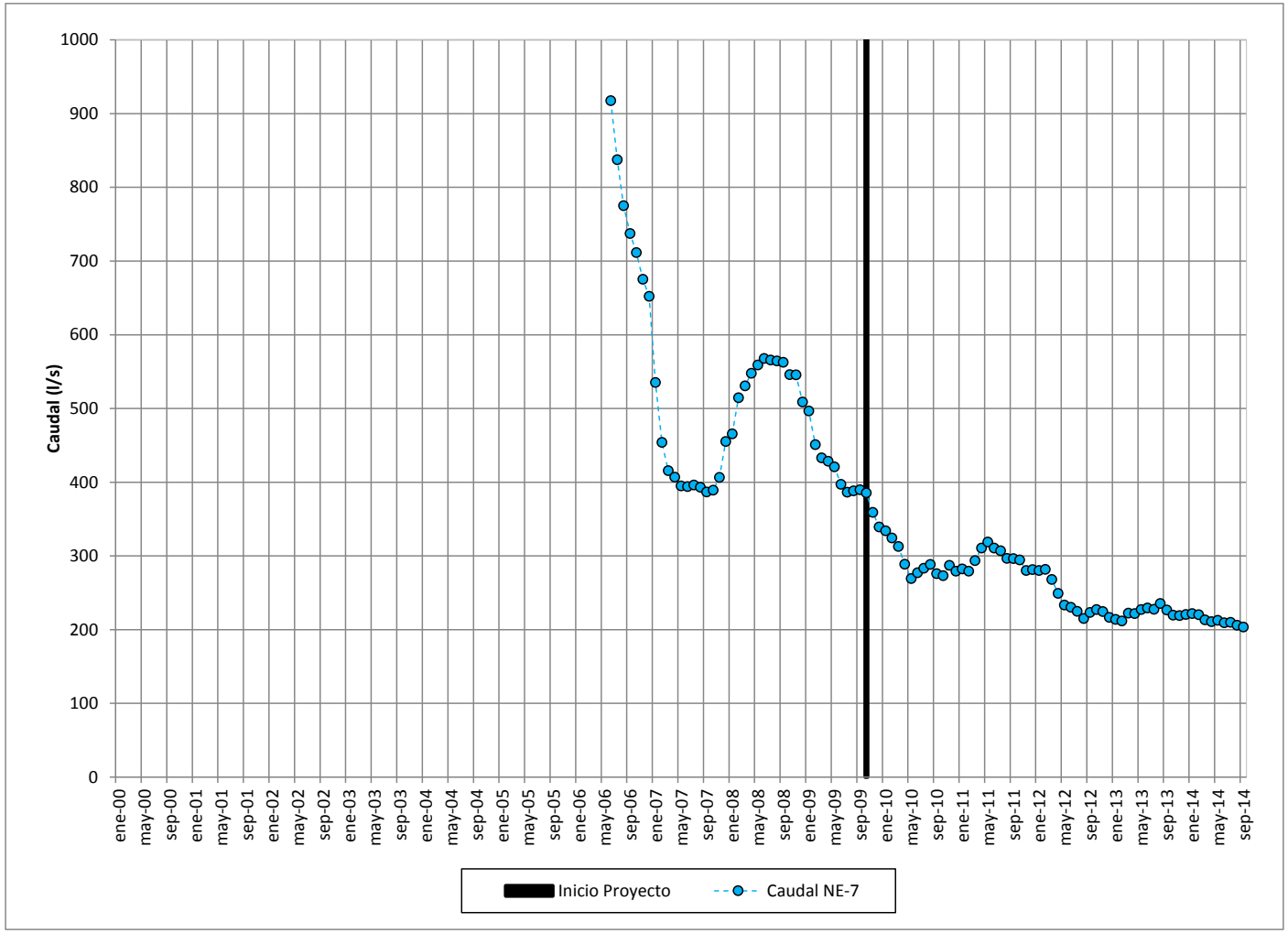
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.20
Serie de Medias Móviles de Caudales en NE-4



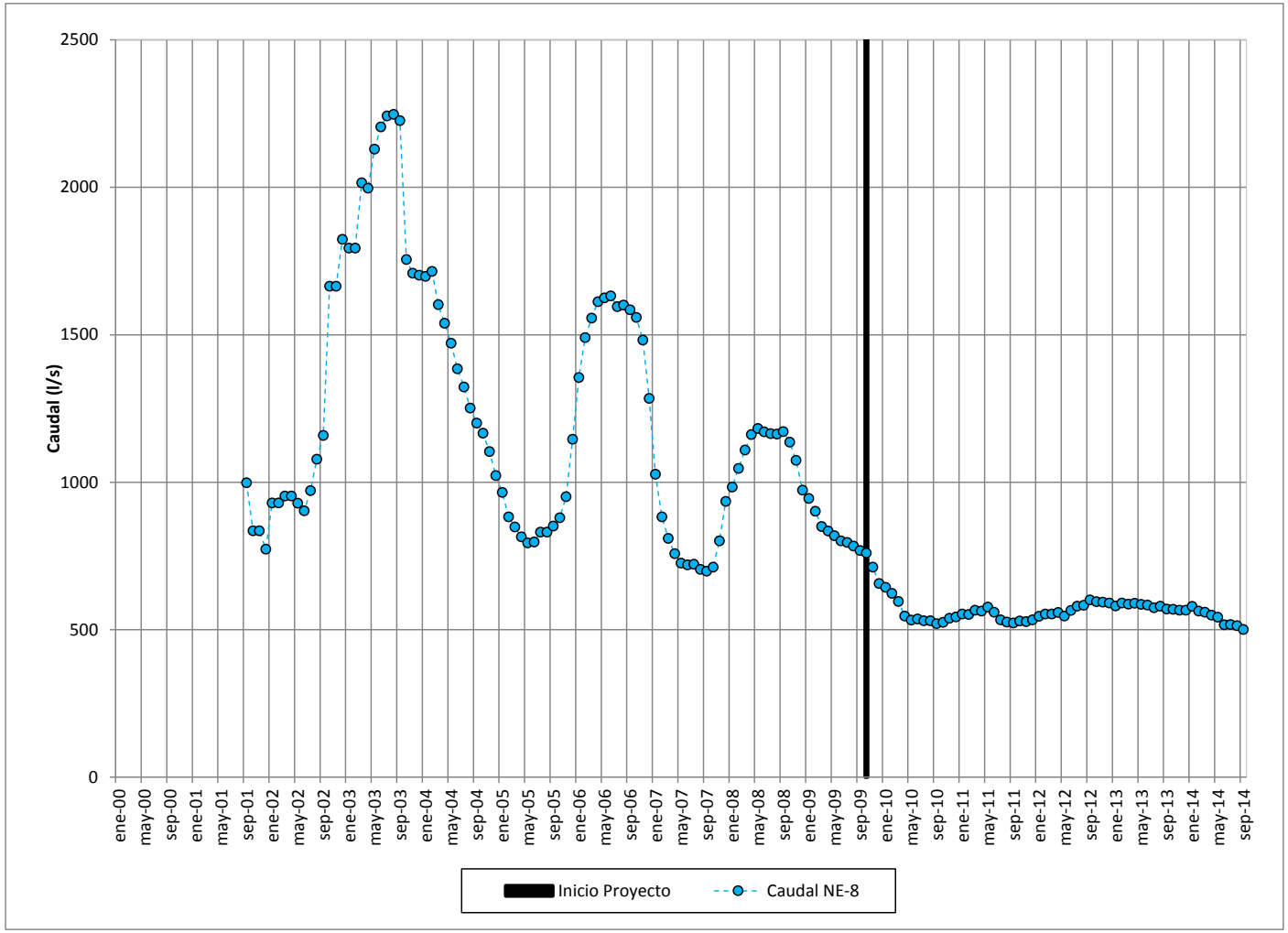
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.21
Serie de Medias Móviles de Caudales en NE-7



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.22
Serie de Medias Móviles de Caudales en NE-8



Fuente: Elaboración Propia.

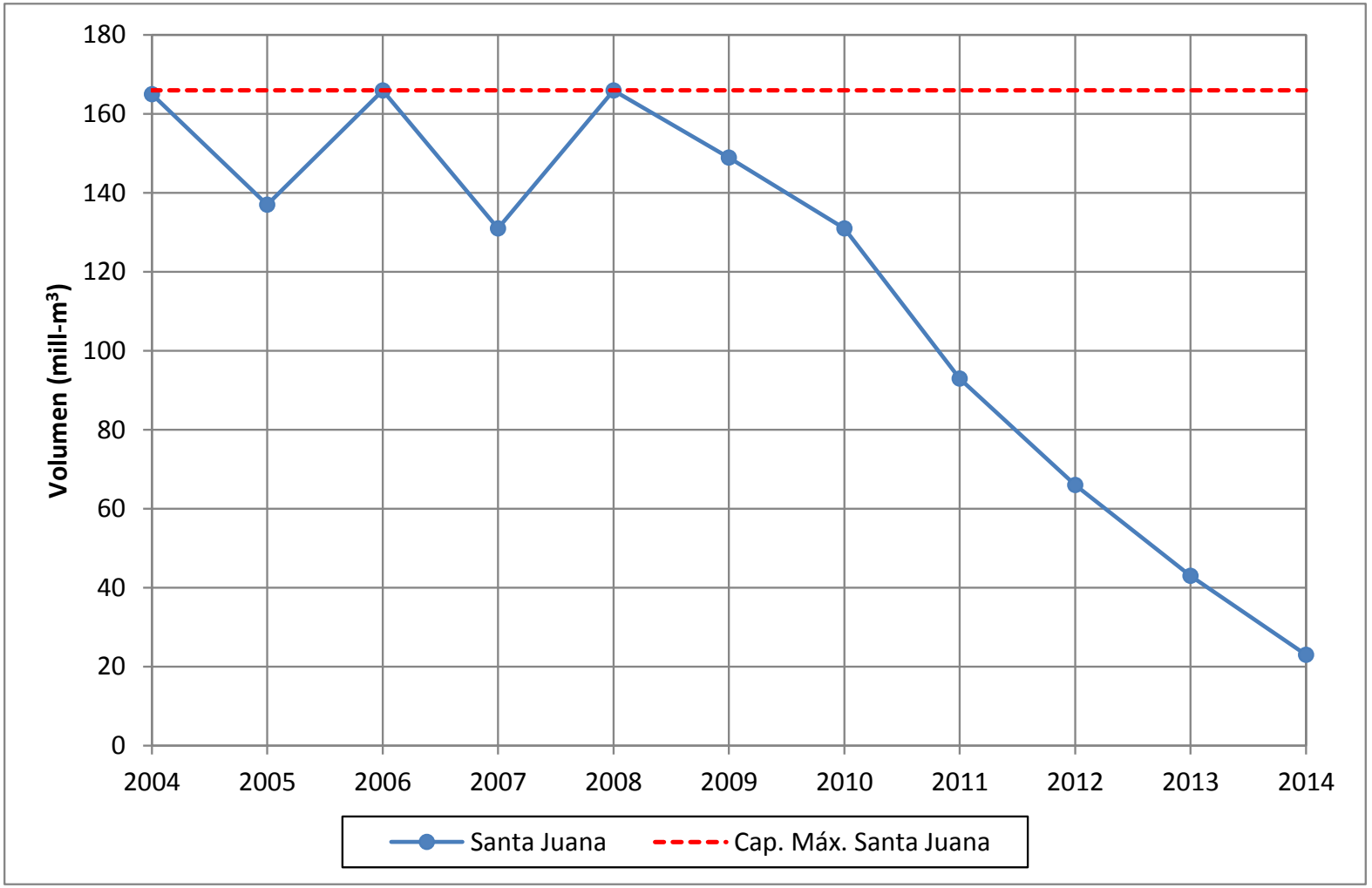
5. VOLUMEN ALMACENADO EN EMBALSE SANTA JUANA

Además de la información de precipitación y caudales mostrada en los capítulos anteriores, se incorpora como elemento de análisis la estadística de volumen almacenado en el embalse Santa Juana, el cual también permite evidenciar la evolución de la disponibilidad de agua en la cuenca del río Huasco, en la cual se emplaza el Proyecto Pascua Lama.

En la Figura 5.1 se presenta un gráfico con el volumen embalsado medido desde el año 2004. Como se observa en ésta, en los últimos años los valores han disminuido de forma sostenida, llegando a mínimos históricos.

En el año 2014, el volumen medido es de 23 mill-m^3 que representan un 14% de la capacidad máxima del embalse, que corresponde a 166 mill-m^3.

Figura 5.1
Volumen Almacenado en Embalse Santa Juana



Fuente: Elaboración Propia.

6. CONCLUSIONES

A partir de la información presentada y analizada en los capítulos anteriores, respecto a la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del río Huasco, tanto a nivel regional como local, se puede concluir lo siguiente:

- Según el análisis estadístico basado en el índice ONI, durante el periodo en estudio que va desde el año 2000 hasta el 2104, se pueden considerar como años "Niño" los años 2002, 2004 y 2009, siendo el primero, el único de magnitud considerable. En base al mismo índice, los años "Niña" corresponderían a los años 2000, 2008 y 2010, siendo el primero, el único de magnitud considerable.

- En términos de la precipitación, tanto las estaciones regionales (Conay y Vallenar) como la local (Barriales), muestran que en los últimos años la cantidad de agua precipitada ha disminuido. Desde una perspectiva regional, se observa que existe una clara tendencia a la baja desde el último evento de precipitación importante ocurrido el año 2002, aunque para la estación Vallenar dicha disminución se vio interrumpida los años 2010 y 2011. A nivel local, en la estación Barriales, se aprecia la misma tendencia de disminución de los montos anuales de precipitación desde el año 2002.

- Los registros de precipitaciones y de nieve de los últimos tres años, de las cuatro estaciones meteorológicas analizadas, se encuentran bajo el promedio histórico correspondiente al período 2000 – 2014.

- Respecto a la relación que existe entre los fenómenos ENSO y la cantidad de precipitación registrada tanto a nivel regional como local, se puede indicar que existe una consistencia entre los registros de precipitación del año 2000 en las estaciones Conay, Vallenar y Barriales, con el índice ONI que da cuenta de la ocurrencia del fenómeno Niño durante ese mismo año. En cambio, durante los años 2000, 2008 y 2010 según el mismo índice se habrían registrado eventos Niña, los que sin embargo no presentan relación con los registros de precipitación regionales y locales, dado que si bien en dichos años se registraron precipitaciones bajo el promedio, estas no corresponden a los mínimos históricos.

- En cuanto a los caudales registrados desde el año 2000 en adelante en las estaciones ubicadas en el área del Proyecto, se observa que existe una tendencia histórica de descenso que se presenta con anterioridad al comienzo de la construcción del Proyecto en octubre de 2009, la que se ha mantenido posteriormente. Es decir, el sistema naturalmente ha mostrado las disminuciones mencionadas dadas a su vez por la tendencia a la baja de la precipitación.

- En los dos aportes laterales al río Del Estrecho/Chollay, provenientes de la quebrada Barriales y río Blanco, donde se ubican las estaciones NE-1A y NE-7 respectivamente, en áreas no intervenidas por el Proyecto, se verifica la misma tendencia indicada en el punto anterior, la que incluso se mantiene en el período post inicio construcción. Esto permite verificar que las disminuciones de caudal que se han registrado en la cuenca del río Del Estrecho/Chollay, efectivamente tienen un origen natural, a lo que en el caso de las estaciones NE-5, NE-2A, NE-3, NE-4 y NE-8, se le suma el efecto de la construcción del Proyecto, desde octubre de 2009 en adelante.

- Adicionalmente, es importante tener a la vista, los registros del agua almacenada en el embalse Santa Juana, que dan cuenta de una disminución abrupta desde el año 2008 a la fecha, lo cual confirma lo antes indicado en cuanto a la clara disminución en la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Huasco, más allá del área de influencia del Proyecto.

- Sin embargo, no es posible relacionar tan directamente las tendencias históricas de disminución de precipitación y caudal, con la ocurrencia de eventos ENSO. Esto se debe a al carácter regional que tienen los índices utilizados para determinar cuándo se producen dichos fenómenos (Niño, Niña o Normal), los cuales no siempre se condicen con el comportamiento local de la precipitación.

- Por último, es importante establecer que si bien en el presente documento se busca evidenciar las tendencias naturales de disminución de precipitación y caudal que se han registrado en la cuenca del río Del Estrecho/Chollay, a partir de octubre de 2009 existe un evidente cambio en los registros de escorrentía de las estaciones NE-5, NE-2A, NE-3, NE-4 y NE-8, lo que está directamente relacionado con el comienzo de la construcción del Proyecto Pascua Lama (sumado a los cambios naturales antes indicados).

- De todas formas, de acuerdo a toda la estadística mostrada y analizada en el presente documento, se puede establecer con un alto nivel de certeza que en la cuenca del río Huasco (y en consecuencia en la cuenca del río Del Estrecho/Chollay) se han venido registrando años más bien secos, que han implicado una merma en la escorrentía superficial y una disminución de las reservas de agua naturales y artificiales de la cuenca.

7. REFERENCIAS

- DGA (2014a). Dirección General de Aguas. Pronóstico de Disponibilidad de Agua. Temporada de riego 2014-2015.
- DGA (2014b). Dirección General de Aguas. Información Pluviométrica, Fluviométrica, Estado de Embalses y Aguas Subterráneas.
- DMC (2014). Sitio web Dirección Meteorológica de Chile. http://www.meteochile.gob.cl/nino_nina/nino_nina.html
- DGA (2013). Dirección General de Aguas. Pronóstico de Disponibilidad de Agua. Temporada de riego 2013-2014.
- DGA (2012). Dirección General de Aguas. Pronóstico de Disponibilidad de Agua. Temporada de riego 2012-2013.
- CPC (2011). Sitio web del Climate Prediction Center (CPC), del National Weather System (NWS). http://www.cpc.ncep.noaa.gov/
- DGA (2011). Dirección General de Aguas. Pronóstico de Disponibilidad de Agua. Temporada de riego 2011-2012.
- DGA (2010). Dirección General de Aguas. Pronóstico de Disponibilidad de Agua. Temporada de riego 2010-2011.
- DGA (2009). Dirección General de Aguas. Pronóstico de Disponibilidad de Agua. Temporada de riego 2009-2010.
- Guevara (2008). El ABC de los índices usados en la identificación y definición cuantitativa de EL NIÑO - oscilación del sur (ENSO). Guevara, José Manuel. Enero, 2011.
- SHOA (2003). Ciclos El Niño/La Niña. Período 1991-2000 y su influencia en las costas norte y central de Chile.