

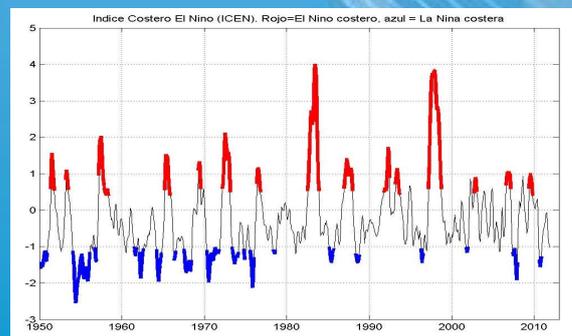
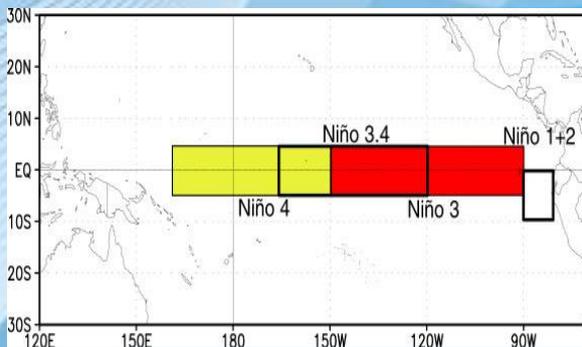
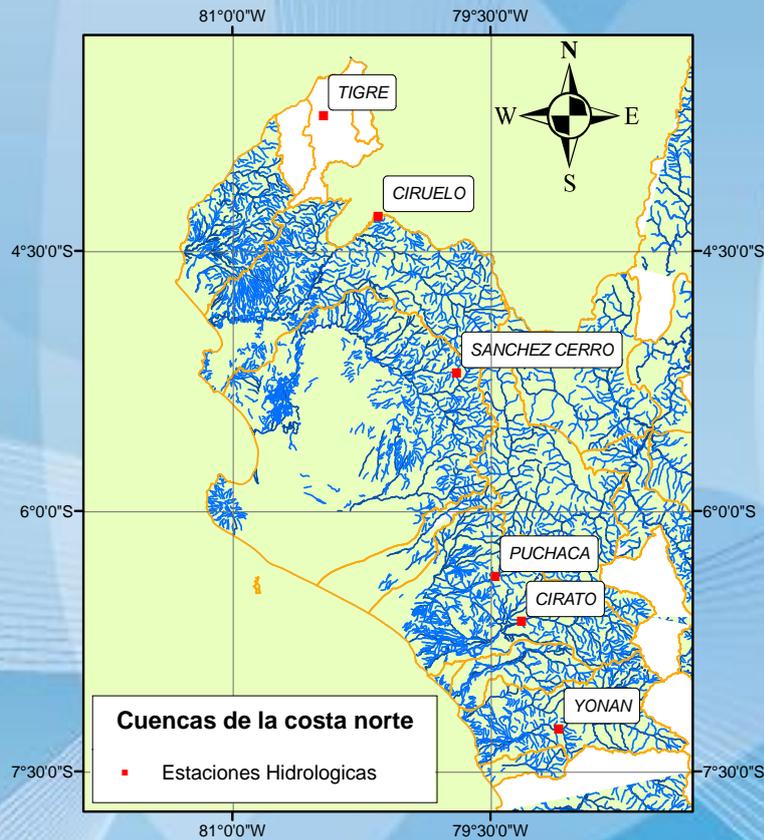


PERÚ

Ministerio del Ambiente

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI

ÍNDICES CLIMÁTICOS COMO PREDICTOR DEL CAUDAL EN LA COSTA NORTE DEL PERÚ



LIMA - PERÚ



2012



PRESIDENTA EJECUTIVA DEL SENAMHI
Ing. AMELIA DIAZ PABLÓ

DIRECTOR GENERAL DE HIDROLOGÍA Y
RECURSOS HÍDRICOS
Dr. JUAN JULIO ORDOÑEZ GALVEZ

DIRECTOR DE HIDROLOGÍA APLICADA
Ing. OSCAR FELIPE OBANDO

DIRECTOR DE HIDROLOGÍA OPERATIVA
Ing. JUAN ARBOLEDA OROZCO

RESPONSABLE :
MSc. LUIS METZGER TERRAZAS

REVISIÓN:
Dr. JUAN JULIO ORDOÑEZ GALVEZ

LIMA – PERÚ

2012

INDICE

I. ANTECEDENTES	1
II. OBJETIVOS	1
2.1 General	1
2.2 Específicos.....	1
III. JUSTIFICACION	1
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	2
4.1. Área de estudio	2
4.2. Información requerida.....	4
4.3. Marco teórico	4
a) Índice de Oscilación del Sur (SOI).....	4
b) Oscilación Decadal del Pacífico (PDO).....	8
c) Índice ENSO Multivariado (MEI)	9
d) Temperatura Superficial del Mar (TSM)	9
e) Índice Costero El Niño (ICEN)	11
• Categorías	11
• Identificación de eventos	11
f) Presión a nivel del mar (SLP)	12
4.4. METODOLOGIA.....	12
a) Correlación Cruzada	13
b) Modelos de Regresión	13
V. RESULTADOS	15
5.1. Estación El Tigre	15
5.2. Estación Sánchez Cerrio	18
5.3. Estación El Ciruelo	21
5.4. Estación Racarumi	23
5.5. Estación Puchaca.....	25
5.6. Estación Yonán	28
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	31
6.1. Conclusiones.....	31
6.2. Recomendaciones.....	32
VII. ANEXOS.....	33

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1	Ubicación de estaciones hidrológicas en el área de estudio	2
Fig. 2	Hidrograma de caudales mínimos medios mensuales	3
Fig. 3	Hidrograma de caudales máximos medios mensuales	4
Fig. 4	Índice de oscilación del sur estandarizado (NOAA)	5
Fig. 5	Índice de oscilación del sur (BoM Australia)	6
Fig. 6	Patrones océano-atmosféricos durante un evento El Niño	7
Fig. 7	Índices PDO basados en proyecciones de Temperatura del mar observado en el Pacífico Norte y patrones de presión a nivel del mar	8
Fig. 8	Clasificación de las regiones El Niño	9
Fig. 9	Temperatura superficial del mar en el Pacífico por región El Niño	10
Fig. 10	Temperatura superficial del mar decadal en el pacífico por región Niño	10
Fig. 11	Índice Costero el Niño (ICEN)	12
Fig. 12	Caudal del río Tumbes simulado con el modelo de regresión	17
Fig. 13	Validación del caudal simulado del río Tumbes y pronóstico para diciembre 2012/17	17
Fig. 14	Caudal del río Piura simulado con el modelo de regresión	20
Fig. 15	Validación del caudal simulado del río Piura	20
Fig. 16	Caudal del río Chira simulado con el modelo de regresión	22
Fig. 17	Validación del caudal simulado del río Chira y pronóstico para enero 2013	22
Fig. 18	Caudal del río Chancay-Lambayeque simulado con el modelo de regresión	25
Fig. 19	Validación del caudal simulado del río Chancay-Lambayeque y pronóstico para el mes de enero 2013	25
Fig. 20	Caudal del río La Leche simulado con el modelo de regresión	27
Fig. 21	Validación del caudal simulado del río La Leche	27
Fig. 22	Caudal del río Jequetepeque simulado con el modelo de regresión	30
Fig. 23	Validación del caudal simulado del río Jequetepeque	30

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Superficie cosechada – producción y rendimiento de caña de azúcar	3
Tabla 2	Coordenadas geográficas de estaciones hidrológicas	4
Tabla 3	Clasificación del Índice ICEN	11
Tabla 4	Correlación del caudal medio del río Tumbes con los índices climáticos	16

Tabla 5	Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros para El Tigre	17
Tabla 6	Correlación del caudal medio del río Piura con los índices climáticos.....	18
Tabla 7	Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros para Sánchez Cerro..	18
Tabla 8	Correlación del caudal medio del río Chira con los índices climáticos	21
Tabla 9	Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros para Ciruelo.....	21
Tabla 10	Correlación del caudal medio del río Chancay Lambayeque con los índices climáticos	23
Tabla 11	Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros para Racarumi	24
Tabla 12	Correlación del caudal medio del río La Leche con los índices climáticos	26
Tabla 13	Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros para Puchaca	26
Tabla 14	Correlación del caudal medio del río Jequetepeque con los índices climáticos	28
Tabla 15	Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros para Yonán	29

LISTA DE ANEXOS

A1.	Hidrograma de caudales normales	33
A2.	Estadísticas de la simulación y validación.....	33

ÍNDICES CLIMÁTICOS COMO PREDICTOR DEL CAUDAL EN LA COSTA NORTE DEL PERÚ

I. INTRODUCCIÓN

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) tiene la misión de informar al público en general sobre las condiciones meteorológicas e hidrológicas a nivel nacional.

Las actividades realizadas en la Dirección de Hidrología Aplicada están orientadas a la implementación de metodologías, elaboración de herramientas y/o sistemas que permitan mejorar la calidad de los productos generados tales como: pronósticos, boletines, estudios, artículos científicos, etc.

En ese sentido se ha elaborado el informe "Índices climáticos como predictor del caudal en el norte del Perú". Dicho estudio ha permitido identificar los índices y/o variables climáticas que tienen mayor capacidad predictiva en los caudales mensuales de las cuencas de los ríos de la costa norte del Perú.

II. OBJETIVOS

2.1 General

Identificar variables climáticas que puedan ser usadas para estimar el caudal de los principales ríos de la costa norte del Perú.

2.2 Específicos

- Evaluar las correlaciones de los índices versus el caudal mensual en diversas cuencas de la costa norte del Perú.
- Determinar ecuaciones que puedan ser usadas para estimar el caudal.

III. JUSTIFICACIÓN

Se sabe que la región norte de Perú es propensa a lluvias intensas durante algunos meses del año y que esta situación se torna crítica durante la época del Fenómeno El Niño. También, es de conocimiento público que el Fenómeno ENSO es monitoreado por la NOAA por medio de su Centro de Predicción Climática. Es por lo tanto importante y necesario utilizar la información disponible que existe en la actualidad para tratar de determinar el posible comportamiento de los ríos de la costa norte del Perú con algún tiempo de anticipación.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del presente estudio, se tuvo en consideración los aspectos siguientes:

4.1 Área de estudio

La zona de estudio considera las cuencas más representativas de la costa norte de Perú y se mencionan a continuación: Tumbes, Piura, Chancay-Lambayeque, La Leche y Jequetepeque (**Figura 1**). Estas cuencas se encuentran ubicadas entre las latitudes $3^{\circ} 30' S - 7^{\circ} 30' S$ y las longitudes $80^{\circ} 30' W - 78^{\circ} 30' W$.



Figura 1. Ubicación de estaciones hidrológicas en el área de estudio

Fuente: Elaboración propia

La importancia de esta región del Perú es que en los últimos años, la agricultura ha experimentado un crecimiento variable en el área de la superficie cosechada, este crecimiento es aún más notorio en la producción, un ejemplo de esto es la caña de azúcar, la cual se cultiva en 5 regiones y el 77% se encuentra en la costa

norte. La Libertad destaca como primer productor de caña de azúcar a nivel nacional con un 46% de la producción, Lambayeque con un 23 % es el segundo mayor productor (**Tabla 1**).

Los caudales medios mensuales de los ríos Tumbes, Piura y Chira muestran su caudal más bajo en Noviembre y los ríos Chancay-Lambayeque, La Leche y Jequetepeque muestran su caudal más bajo en Setiembre. En el caso de los caudales máximos; en promedio estos se presentan en Marzo para todos los ríos evaluados (**Figuras 2 y 3**).

Tabla 1. Superficie cosechada – producción y rendimiento de caña de azúcar

AÑO	SUPERFICIE COSECHADA	PRODUCCION	RENDIMIENTO
	ha.	t.	t/ha.
1999	58,127	6,278.60	108.02
2000	63,808	7,135.20	111.821
2001	60,373	7,386.00	122.339
2002	68,050	8,419.80	123.73
2003	77,720	8,864.00	114.03
2004	70,851	6,945.70	98.03
2005	61,549	6,304.10	102.42
2006	65,847	7,245.80	102.5
2007	68,491	8,283.60	121.09
2008	69,127	9,396.00	135.92
2009	75,348	10,100.10	131.88

Fuente: INEI, 2008.

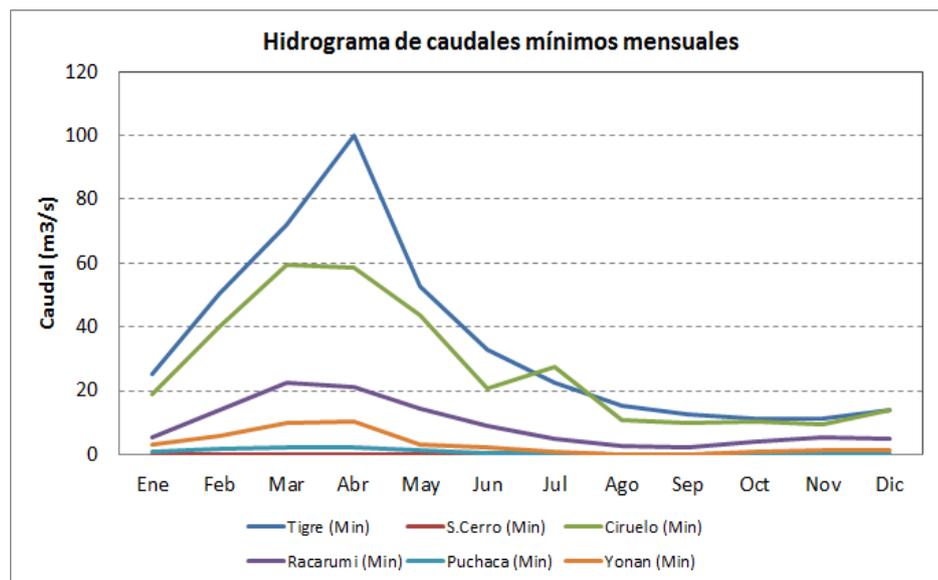


Figura 2. Hidrograma de caudales mínimos medios mensuales
Fuente: Elaboración propia

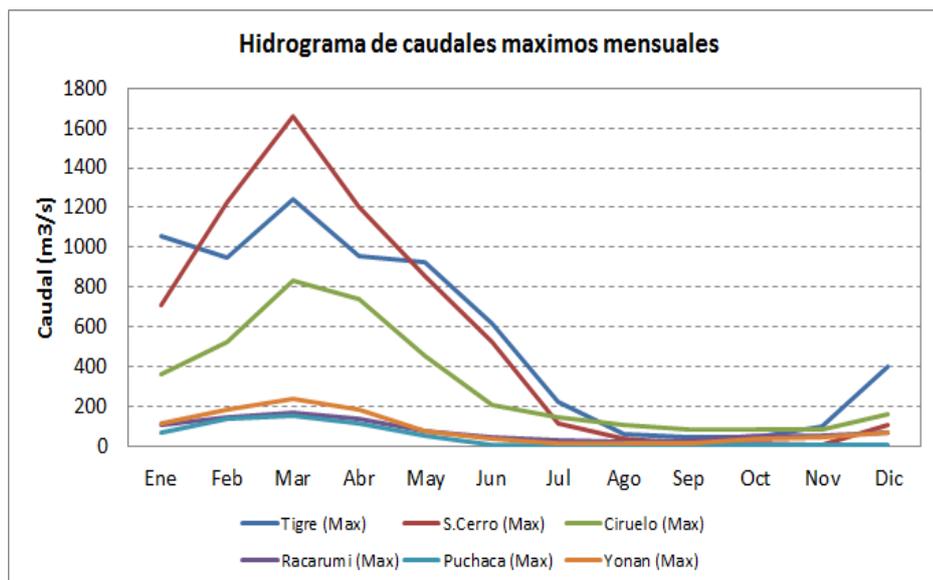


Figura 3. Hidrograma de caudales máximos medios mensuales

Fuente: Elaboración propia

4.2 Información requerida

La información utilizada en este informe corresponde a los caudales medios mensuales de 6 estaciones hidrológicas localizadas en cuencas de la región norte del Perú y que se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Coordenadas geográficas de estaciones hidrológicas

Nº	Estación	Cuenca	Latitud	Longitud	Altitud
1	Tigre	Tumbes	-3.7160	-80.4670	40
2	Sanchez Cerro	Piura	-5.1986	-79.6950	298
3	Ciruelo	Chira	-4.3000	-80.1500	250
4	Racarumi	Chancay-lambayeque	-6.6336	-79.3169	250
5	Puchaca	La leche	-6.3736	-79.4695	355
6	Yonan	Jequetepeque	-7.2500	-79.1000	428

Fuente: Elaboración propia

4.3 Marco teórico

Se han utilizado los índices climáticos clásicos tales como: SOI, MEI, PDO, SLP así como la temperatura superficial del mar en las 4 regiones Niño. A continuación se describe cada uno de estos índices.

a) Índice de Oscilación del Sur (SOI)

Según la NOAA, el Índice Oscilación del Sur (**Figura 4**) es un índice estandarizado basado en la diferencia de presiones del nivel del mar observadas entre Tahití y Darwin, Australia.

El SOI es una medida de las fluctuaciones de gran-escala en la presión del aire que ocurre entre el pacífico tropical este y oeste durante episodios El Niño y La Niña. En general, series de tiempo suavizadas del SOI corresponden muy bien con cambios en la temperatura del océano a lo largo del Pacífico tropical este.

Periodos prolongados de valores negativos/positivos del SOI coinciden con un anormal calentamiento/enfriamiento de las aguas del océano a lo largo del Pacífico tropical este típico de episodios El Niño/La Niña.

La metodología usada para calcular el SOI se indica a continuación:

$$SOI = \left(\frac{\text{Tahití standarizado} - \text{Darwin standarizado}}{MSD} \right)$$

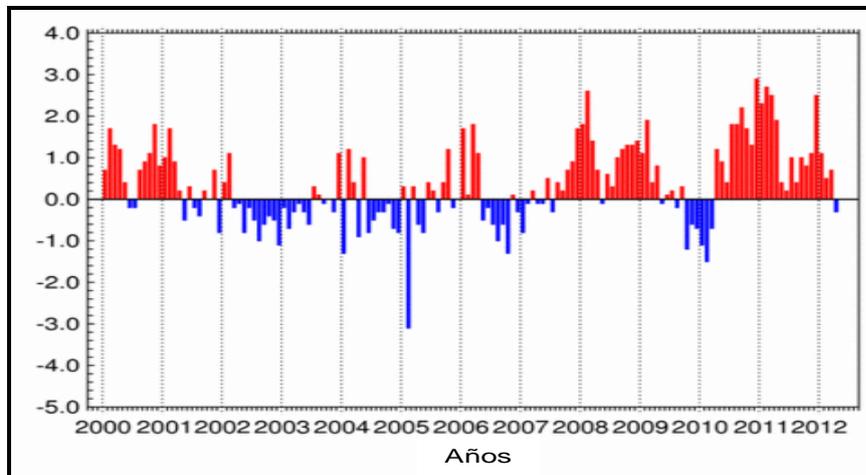


Figura 4. Índice de Oscilación del Sur estandarizado
Fuente NOAA, 2012

Donde:

$$\text{Tahiti standarizado} = \frac{(\text{SLP Tahiti Actual} - \text{SLP Tahiti promedio})}{\text{Desviación standar Tahiti}}$$

$$\text{Desviación standar Tahiti} = \sqrt{\frac{\sum (\text{SLP Tahiti Actual} - \text{SLP Tahiti promedio})^2}{N}}$$

$$\text{Darwin standarizado} = \left(\frac{\text{SLP Darwin Actual} - \text{SLP Darwin promedio}}{\text{Desviación standsar Darwin}} \right)$$

$$\text{Desviación estándar Darwin} = \sqrt{\frac{\sum (\text{SLP Darwin Actual} - \text{SLP Darwin promedio})^2}{N}}$$

Donde:

N = Número de meses

$$MSD = \text{Desviación standar mensual} = \sqrt{\frac{\sum(\text{Tahití standarizado} - \text{Darwin standarizado})^2}{N}}$$

Donde:

N = Número de meses acumulado

Según el Bureau de meteorología de Australia, el índice SOI da una indicación del desarrollo y la intensidad de los eventos El Niño o La Niña en el océano Pacífico. El SOI es calculado usando la diferencia de presiones entre Tahití y Darwin. Valores sostenidos negativos del SOI mayores a -8 a menudo indican episodios El Niño y valores sostenidos positivos del SOI mayores a $+8$ son típicos de episodios La Niña (**Figura 5**).

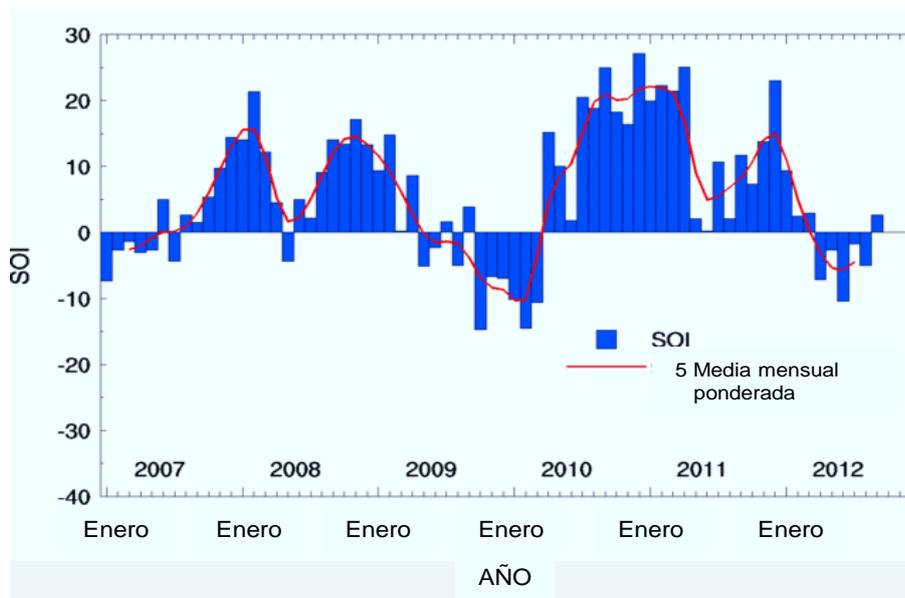


Figura 5. Índice de Oscilación del Sur (BoM Australia)

Fuente: Bureau de Meteorología

Hay diferentes métodos para calcular el SOI. El método usado por el Bureau de Meteorología de Australia es Troup SOI, el cual es la anomalía estandarizada de la diferencia de presiones a nivel del mar entre Tahití y Darwin. Es calculado como:

$$SOI = 10 * \frac{P_{dif} - P_{difv}}{SD(P_{dif})}$$

Donde:

$$P_{dif} = (\text{promedio en Tahití MSLP de un mes}) - (\text{promedio en Darwin MSLP de un mes})$$

$$P_{difav} = \text{promedio de largo plazo del "P dif" para el mes en cuestión.}$$

$$SD(P_{dif}) = \text{desviación estándar de largo plazo de "P dif" para el mes en cuestión.}$$

Se multiplica por 10 por convención. Usando esa convención, los rangos de SOI van entre -35 a $+35$, y el valor del SOI puede anotarse como un número entero. El SOI se computa con base en meses, con valores sobre largos períodos (años). Valores diarios o semanales del SOI no convienen como información práctica del estado real del clima. Los valores diarios pueden fluctuar marcadamente debido a los patrones diarios del tiempo y no deberían usarse para propósitos climáticos (**Figura 6**).

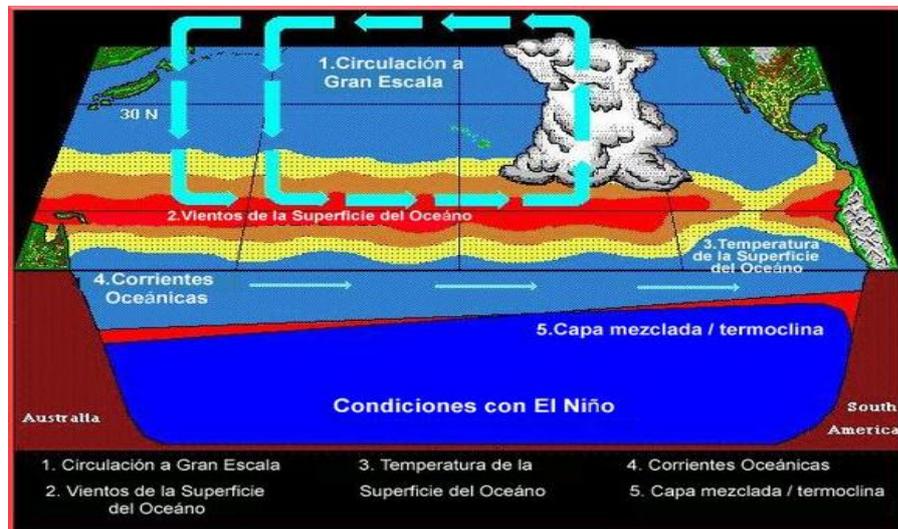


Figura 6. Patrones océano-atmosféricos durante un evento El Niño

Fuente: www.meted.ucar.edu

Las series de tiempo del SOI y las temperaturas de la superficie del mar en el Pacífico ecuatorial del este, indican que el ciclo ENSO tiene un periodo promedio de aproximadamente 4 años, aunque en el registro histórico el periodo a variado entre dos y siete años.

Durante los 80's y 90's se presentaron ciclos muy activos del ENSO, con 5 episodios El Niño (1982/83, 1986/87, 1991-1993, 1994/95, y 1997/98) y 3 episodios La Niña (1984/85, 1988/89, 1995/96) ocurriendo en este periodo.

Este periodo también caracterizó dos de los episodios El Niño más fuertes del siglo (1982/83 y 1997/98), así como dos periodos consecutivos El Niño ocurridos durante 1991-1995 sin la ocurrencia de episodios fríos.

b) Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)

La Oscilación Decadal del Pacífico o PDO, es a menudo descrita como un patrón de larga vida de la variabilidad climática del Pacífico (Zhang et al. 1997). Como se ha visto con el índice ENSO, los extremos en el patrón PDO están marcados por variaciones generalizadas en la cuenca del Pacífico y el clima de Norteamérica. En paralelo con el Fenómeno ENSO, las fases extremas del PDO han sido clasificadas como de origen ya sea caliente o frío, como esta definido por las anomalías de la temperatura del océano en el océano noreste y Pacífico tropical.

Dos características principales distinguen al PDO del ENSO. Primero, eventos típicos del PDO han mostrado una persistencia notable a la que se le atribuye a los eventos ENSO - en este siglo, las grandes eras del PDO han persistido por 20 a 30 años (Mantua et al. 1997, Minobe 1997). Segundo, las huellas climáticas del PDO son mas visibles en el sector Pacífico Norte (Norteamericano), mientras que firmas secundarias existen en los trópicos - lo opuesto es cierto para el ENSO.

Diversos estudios muestran evidencia de solo dos ciclos completos del PDO en el pasado siglo (i.e. Mantua et al. 1997, Minobe 1997): regímenes fríos del PDO prevalecieron entre 1890-1924 y 1947-1976, mientras que regímenes calientes predominaron entre 1925-1946 y desde 1977 hasta (por lo menos) mediados de los 90's. Cambios recientes en el clima del Pacífico sugieren una posible inversión a condiciones frías del PDO en 1998 (**Figura 7**).

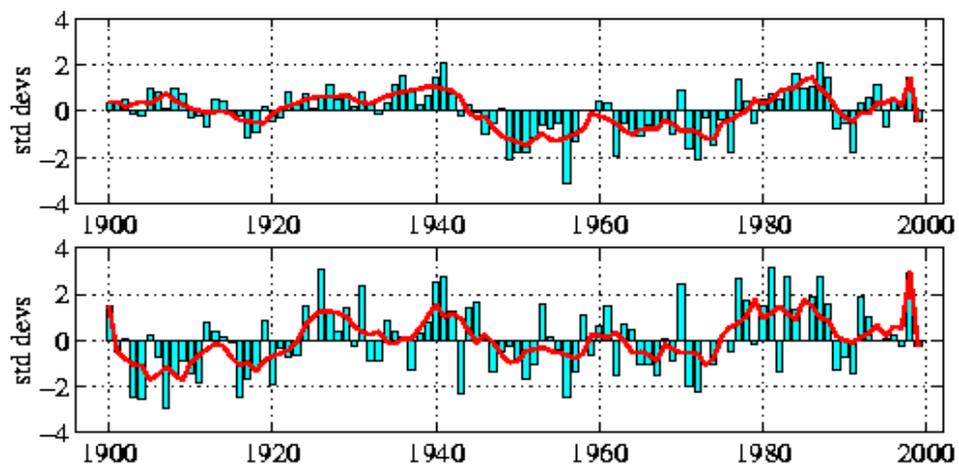


Figura 7. Índices PDO basados en proyecciones de Temperatura del mar observado en el Pacífico Norte y patrones de presión a nivel del mar. Los índices están normalizados de Octubre-Marzo. Las líneas rojas indican valores de media móvil de 5-años para cada índice.

Fuente: www.cambioclimaticoenergia.blogspot

c) Índice ENSO Multivariado

Es un índice compuesto que usa un número de variables para medir los eventos ENSO. El MEI usa temperaturas de la superficie del mar, temperatura del aire, presión a nivel del mar, viento superficial zonal y meridional y cantidad total de nubosidad.

Valores positivos del MEI están relacionados a la fase cálida de los eventos El Niño y los valores negativos con los eventos fríos o La Niña.

d) Temperatura Superficial del Mar (TSM)

Para muestrear los datos de temperatura superficial del mar, el Pacífico tropical ha sido dividido en regiones llamadas: Niño 1, 2, 3, 4, y 3.4 (la cual abarca parte de las regiones 3 y 4) (**Figura 8**). A continuación se indica las áreas que abarca cada región:

Niño 1 definida por:	80°W - 90°W	y	5°S - 10°S
Niño 2 definida por:	80°W - 90°W	y	0° - 5°S
Niño 3 definida por:	90°W - 150°W	y	5°N - 5°S
Niño 4 definida por:	150°W - 160°E	y	5°N - 5°S
Niño 3.4 definida por:	120°W - 170°W	y	5°N - 5°S

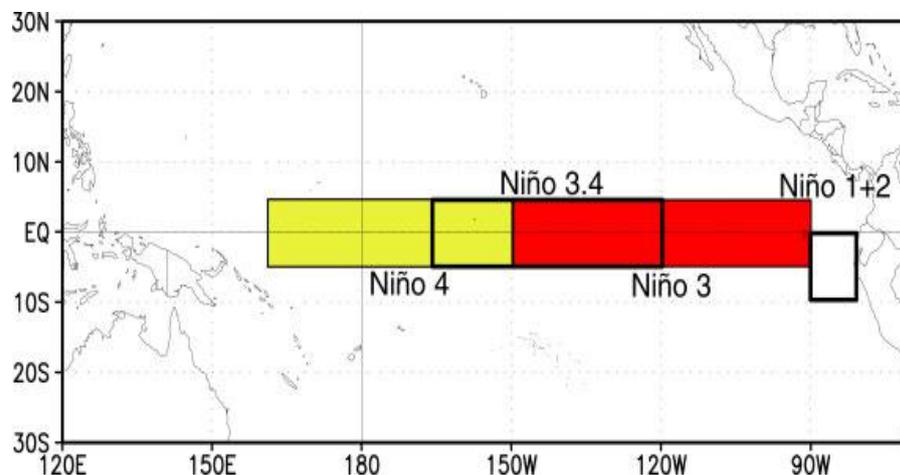


Figura 8. Clasificación de las regiones el Niño

Fuente: www.meted.ucar.edu

El IGP ha planteado un nuevo índice costero El Niño (ICEN) el cual reflejaría mejor los impactos en el ecosistema marino-costero del país así como las fuertes lluvias en la vertiente Nor-occidental de nuestro territorio. El Índice ENSO de la NOAA de EEUU para la región 3.4 del Pacífico Ecuatorial, sería según el IGP un fenómeno global que afecta a varios lugares del planeta, incluso al Perú (**Figura 9**).

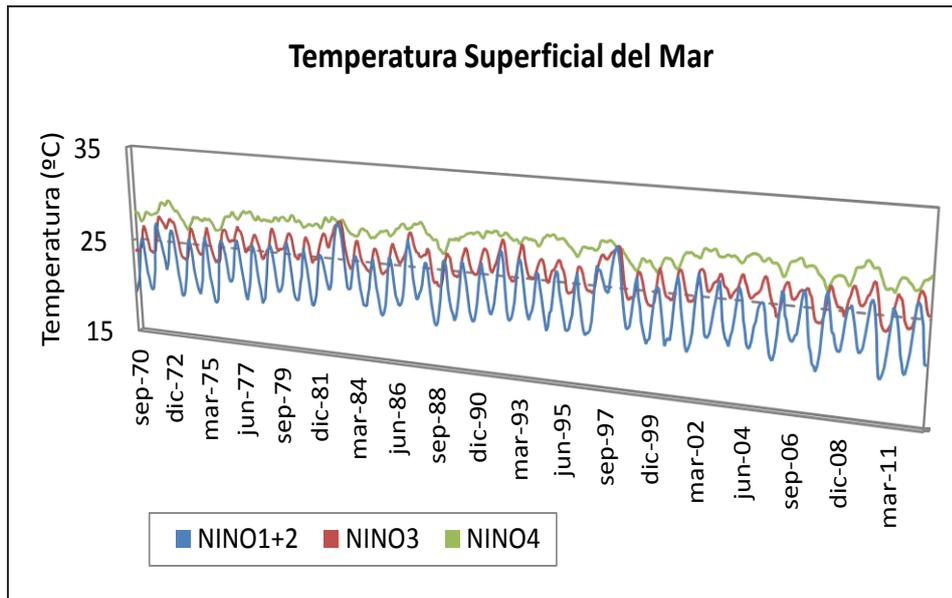


Figura 9. Temperatura superficial del mar en el Pacífico por región El Niño
Fuente: Igp, 2011

De la **Figura 9**, se observa que la temperatura en la región Niño 4 es la mayor temperatura registrada en todo el Pacífico, en la región Niño 3 se registra una temperatura menor que en la región Niño 4 pero mayor que en la región Niño 1+2. Finalmente, en la región Niño 1+2 se registra la menor temperatura del océano Pacífico esto debido a la corriente fría de Humboldt, sin embargo durante el verano la temperatura del mar en esta región alcanza valores cercano a los de la región Niño 3 (**Figura 10**).

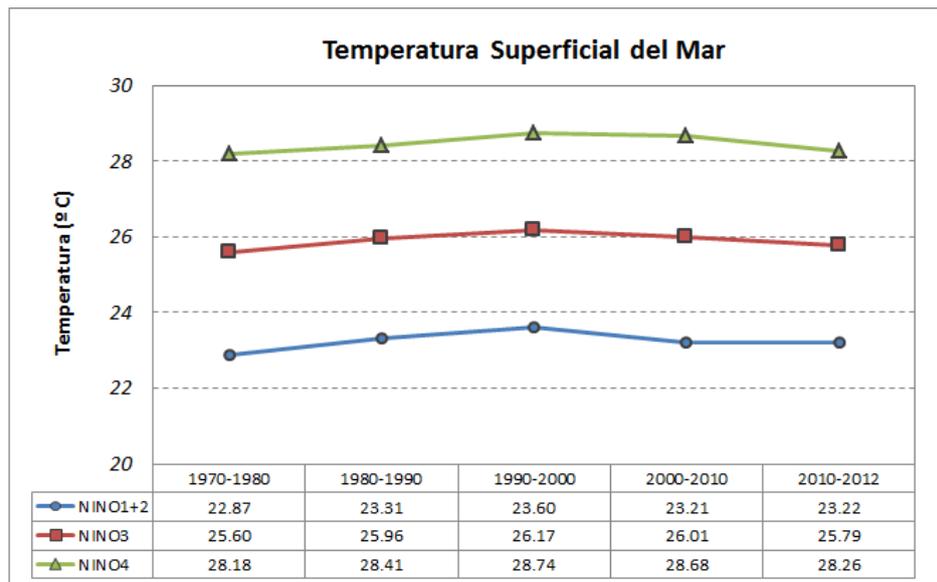


Figura 10. Temperatura Superficial del Mar Decadal en el Pacífico por región Niño
Fuente: Igp, 2011

e) Índice Costero El Niño (ICEN)

Consiste en la media corrida de tres meses de las anomalías mensuales de la temperatura superficial del mar (TSM) en la región Niño 1+2. Estas anomalías se calculan usando la climatología mensual calculada para el periodo base 1981-2010.

La fuente de datos para este índice son las TSM absolutas del producto ERSST v3b de la NOAA (EEUU) para la región Niño 1+2, las cuales se pueden obtener de internet en el siguiente link:

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/ersst3b.nino.mth.ascii>

Para el cálculo y uso en tiempo real, si fuera necesario se puede utilizar temporalmente el valor aproximado ICEN_{tmp}, que se calculará igual que el ICEN pero reemplazando los datos mensuales faltantes con pronósticos mensuales consensuados por el Comité Técnico del ENFEN. Este índice tendrá carácter transitorio y su valor será reemplazado por el ICEN correspondiente cuando se tengan disponibles los datos necesarios.

- **Categorías**

A cada mes se le asignará una categoría. La categoría de "Condiciones Frías" incluye las magnitudes: "Débil", "Moderada", y "Fuerte". La categoría "Condiciones Cálidas" incluye las magnitudes: "Débil", "Moderada", "Fuerte" y "Extraordinaria". Las categorías y magnitudes de estas se asignan de acuerdo con el valor correspondiente de ICEN según indicado en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Clasificación del Índice ICEN

Categorías	ICEN
Fria Fuerte	Menor que -1.4
Fria Moderada	Mayor o igual que -1.4 y menor que -1.2
Fria Débil	Mayor o igual que -1.2 y menor que -1.0
Neutras	Mayor o igual que -1.0 y menor o igual que 0.4
Cálida Débil	Mayor que 0.4 y menor o igual que 1.0
Cálida Moderada	Mayor que 1.0 y menor o igual que 1.7
Cálida Fuerte	Mayor que 1.7 y menor o igual que 3.0
Cálida Extraordinaria	Mayor que 3.0

Fuente: Igp, 2011

- **Identificación de eventos**

Para la identificación y magnitud de los "eventos" La Niña y El Niño se adoptan los siguientes criterios (**Figura 11**):

- ✓ Se denomina "Evento La Niña en la región costera de Perú" (o expresión similar) al periodo en el cual el ICEN indique "condiciones frías" durante al menos tres (3) meses consecutivos. La magnitud de este evento es la mayor alcanzada o excedida por las condiciones de al menos tres (3) meses durante el evento.
- ✓ Se denomina "Evento El Niño en la región costera de Perú" (o expresión similar) al periodo en el cual el ICEN indique "condiciones cálidas" durante al menos tres (3) meses consecutivos. La magnitud de este evento es la mayor alcanzada o excedida en al menos tres (3) meses durante el evento.

f) Presión a nivel del mar (SLP)

Es la presión atmosférica a nivel medio del mar, medida directamente o empíricamente determinada a partir de la estación de presión observada.

También se define como la fuerza ejercida por la atmosfera a nivel del mar (cero metros de elevación) según lo medido por un barómetro.

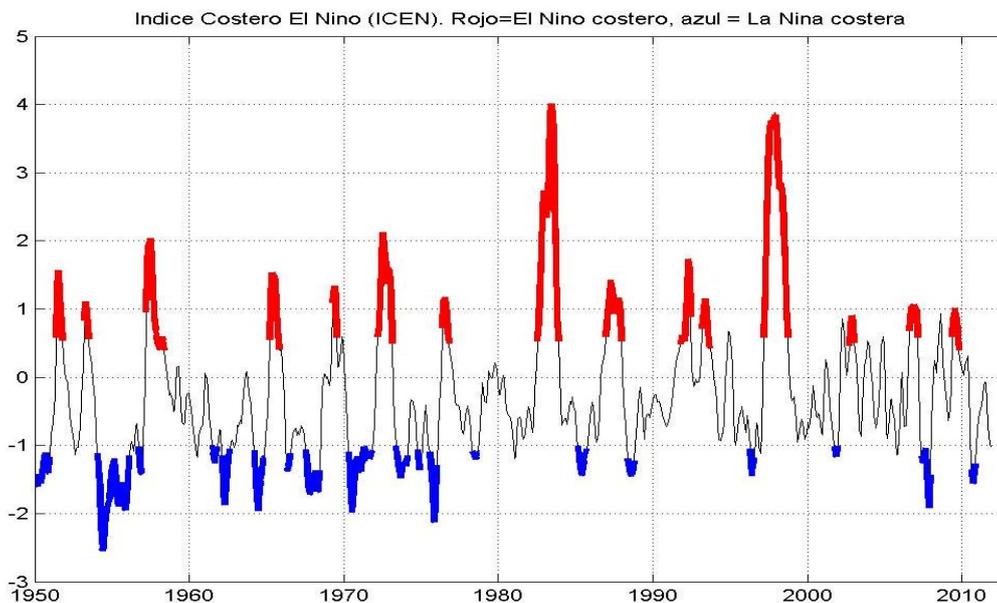


Figura 11. Índice Costero El Niño (ICEN)

Rojo = El Niño Costero

Azul = La Niña Costera

Fuente: Igp, 2011

4.4 Metodología

Se han utilizado herramientas estadísticas con el fin de encontrar la relación entre el caudal (predictando) y las variables océano - atmosféricas (predictor). Para este informe se han considerado los siguientes predictores:

- ✓ Índice de oscilación del Sur
- ✓ Oscilación Decadal del Pacífico
- ✓ Índice ENSO Multivariado
- ✓ Temperatura Superficial del Mar
- ✓ Índice Costero El Niño
- ✓ Presión a nivel del mar

Como predictando se ha considerado los caudales medios mensuales en cada una de las 6 estaciones hidrológicas evaluadas en este estudio.

a) Correlación Cruzada

Para identificar los índices que tienen mayor correlación con el caudal, nos interesa que esa correlación exista pero con un desfase de tiempo con el fin de que los índices puedan ser usados como predictores de la variable caudal.

En este estudio sólo se han considerado correlaciones mayores a 0.5. Se ha calculado para cada caudal los índices que son más significativos, es decir los que presentaron mayor correlación.

b) Modelos de Regresión

Una vez encontrados los índices con mayor correlación, estos se utilizaron para determinar los modelos de regresión. Para este estudio se emplearon tanto modelos lineales como no lineales. A continuación se describen los modelos de regresión evaluados:

- **Lineal.**

Modelo cuya ecuación es $Y = b_0 + (b_1 * t)$. Los valores de la serie se modelan como una función lineal del tiempo.

- **Logarítmica**

Modelo cuya ecuación es $Y = b_0 + (b_1 * \ln(t))$.

- **Inversa**

Modelo cuya ecuación es $Y = b_0 + (b_1 / t)$.

- **Cuadrático**

Modelo cuya ecuación es $Y = b_0 + (b_1 * t) + (b_2 * t^{**2})$. El modelo

cuadrático puede utilizarse para modelar una serie que "despega" o una serie que se amortigua.

- **Cúbico**

Modelo definido por la ecuación $Y = b_0 + (b_1 * t) + (b_2 * t^{**2}) + (b_3 * t^{**3})$.

- **Potencia**

Modelo cuya ecuación es $Y = b_0 * (t^{**b_1})$ ó $\ln(Y) = \ln(b_0) + (b_1 * \ln(t))$.

- **Compuesto**

Modelo cuya ecuación es $Y = b_0 * (b_1^{**t})$ ó $\ln(Y) = \ln(b_0) + (\ln(b_1) * t)$.

- **Curva-S**

Modelo cuya ecuación es $Y = e^{**}(b_0 + (b_1/t))$ ó $\ln(Y) = b_0 + (b_1/t)$.

- **Logística**

Modelo cuya ecuación es $Y = 1 / (1/u + (b_0 * (b_1^{**t})))$ o $\ln(1/Y - 1/u) = \ln(b_0 + (\ln(b_1) * t))$ donde u es el valor del límite superior.

- **Crecimiento**

Modelo cuya ecuación es $Y = e^{**}(b_0 + (b_1 * t))$ ó $\ln(Y) = b_0 + (b_1 * t)$.

- **Exponencial**

Modelo cuya ecuación es $Y = b_0 * (e^{**}(b_1 * t))$ ó $\ln(Y) = \ln(b_0) + (b_1 * t)$.

- **Regresión Polinomial**

Un modelo común "no-lineal" es la regresión polinomial. Esta ecuación puede ser expresada en la ecuación de regresión como: $Y = a + b_1 * X + b_2 * X^2$

En esta ecuación, a representa el intercepto, y b1 y b2 son coeficientes de regresión.

V.- RESULTADOS

La aplicación de los aspectos conceptuales desarrollados en el punto anterior, fueron aplicadas a cada una de las estaciones hidrológicas seleccionadas, dentro de las cuales se han obtenido.

5.1 Estación El Tigre

Se realizó las correlaciones (**Tabla 4**) de los principales índices climáticos del Pacífico con el caudal medio mensual del río Tumbes medido en la estación El Tigre. También se consideró en el análisis el caudal medio del río Tumbes con desfase de un mes.

Tabla 4. Correlación del caudal medio del río Tumbes con los IC

	Lag -10	Lag -9	Lag -8	Lag -7	Lag -6	Lag -5	Lag -4	Lag -3	Lag -2	Lag -1
TIGRE - MEI	0.180	0.195	0.192	0.190	0.195	0.203	0.216	0.239	0.266	0.309
TIGRE - SOI	-0.044	-0.079	-0.127	-0.157	-0.195	-0.214	-0.260	-0.284	-0.267	-0.237
TIGRE - PDO	0.123	0.105	0.080	0.028	-0.026	-0.069	-0.050	0.005	0.073	0.151
TIGRE - ICEN	0.087	0.126	0.168	0.209	0.245	0.273	0.295	0.320	0.348	0.378
TIGRE - Niño 1+2	0.215	-0.025	-0.232	-0.353	-0.367	-0.275	-0.079	0.189	0.474	0.679
TIGRE - Niño 3	0.413	0.232	0.022	-0.133	-0.196	-0.179	-0.098	0.037	0.227	0.448
TIGRE - Niño 3+4	0.346	0.292	0.180	0.076	0.016	-0.003	-0.004	0.015	0.063	0.175
TIGRE - Niño 4	0.110	0.175	0.185	0.172	0.146	0.107	0.040	-0.046	-0.136	-0.170
TIGRE - SLP	0.287	0.487	0.578	0.526	0.354	0.100	-0.155	-0.363	-0.451	-0.389
TIGRE - TIGRE(-1)	0.155	-0.053	-0.208	-0.279	-0.275	-0.201	-0.055	0.170	0.482	0.797

Fuente: Elaboración propia

Para la estación “El Tigre”, se ha encontrado que las mayores correlaciones con el caudal se obtienen con los índices niño1+2 y presión a nivel del mar. La mayor correlación se obtuvo con el mismo caudal medio mensual del río Tumbes con desfase de un mes (Lag-1), se obtuvo 0.797.

También se ha encontrado que con un desfase de un mes (Lag-1) la correlación entre la temperatura del mar en la región niño1+2 y el caudal, fue de 0.679. Y en el caso de la presión a nivel del mar, con un desfase de 8 meses (Lag-8) se obtuvo una correlación de 0.578.

El periodo analizado para la estación El Tigre y los índices mensuales evaluados es desde Setiembre 1970 hasta Diciembre 2011.

A continuación se muestran algunos modelos de regresión evaluados para estimar el caudal en la estación El Tigre (**Tabla 5**).

Se utilizó también la regresión polinomial, la cual resulto tener un mayor ajuste en comparación con los demás modelos. La mejor ecuación encontrada para estimar el caudal en la estación El Tigre, es la que se muestra en el recuadro siguiente:

Tabla 5. Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros para El Tigre**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: tigre

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.174	103.855	1	494	.000	-1245.565	52.599		
Logarítmica	.167	99.119	1	494	.000	-4230.789	1336.473		
Inversa	.161	94.538	1	494	.000	1427.080	-33852.8		
Cuadrático	.254	84.046	2	493	.000	14967.741	-1199.343	24.108	
Cúbico	.258	85.866	2	493	.000	4697.220	.000	-22.483	.602
Compuesto	.250	164.957	1	494	.000	.001	1.551		
Potencia	.246	160.827	1	494	.000	7.12E-015	11.267		
S	.241	156.488	1	494	.000	15.227	-288.096		
Crecimiento	.250	164.957	1	494	.000	-7.297	.439		
Exponencial	.250	164.957	1	494	.000	.001	.439		
Logística	.250	164.957	1	494	.000	1476.052	.645		

La variable independiente esnino3.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: tigre

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.457	416.160	1	494	.000	-1015.358	48.780		
Logarítmica	.436	382.010	1	494	.000	-3370.667	1110.706		
Inversa	.414	349.466	1	494	.000	1205.342	-25028.8		
Cuadrático	.560	313.376	2	493	.000	4486.912	-424.128	10.066	
Cúbico	.564	318.541	2	493	.000	1202.964	.000	-8.077	.257
Compuesto	.713	1226.143	1	494	.000	.003	1.527		
Potencia	.706	1186.387	1	494	.000	2.34E-012	9.828		
S	.696	1129.278	1	494	.000	13.884	-225.535		
Crecimiento	.713	1226.143	1	494	.000	-5.755	.424		
Exponencial	.713	1226.143	1	494	.000	.003	.424		
Logística	.713	1226.143	1	494	.000	315.642	.655		

La variable independiente esnino12.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: tigre

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.354	270.708	1	494	.000	-241.521	35.915		
Logarítmica	.300	211.786	1	494	.000	-562.509	300.727		
Inversa	.236	152.876	1	494	.000	358.807	-2209.685		
Cuadrático	.434	188.654	2	493	.000	323.034	-89.705	6.448	
Cúbico	.435	126.067	3	492	.000	125.684	-20.991	-1.040	.258
Compuesto	.626	826.095	1	494	.000	2.143	1.394		
Potencia	.562	635.007	1	494	.000	.091	2.863		
S	.470	437.595	1	494	.000	6.447	-21.664		
Crecimiento	.626	826.095	1	494	.000	.762	.332		
Exponencial	.626	826.095	1	494	.000	2.143	.332		
Logística	.626	826.095	1	494	.000	.467	.717		

La variable independiente esslp.

Fuente: Elaboración propia

$$Tigre = 537.6 - 0.21 * (nino12)^3 + 0.0074 * (nino12)^4 + 0.027 * (slp_8)^3 - 0.001 * (slp_8)^4 - 0.0822 * (slp_7)^3 + 0.0088 * (slp_7)^4$$

En las **Figuras 12 y 13**, se muestran los análisis comparativos entre el caudal observado en la estación El Tigre y el caudal simulado con el modelo calibrado, apreciándose una muy buena correlación especialmente durante el período de estiaje.

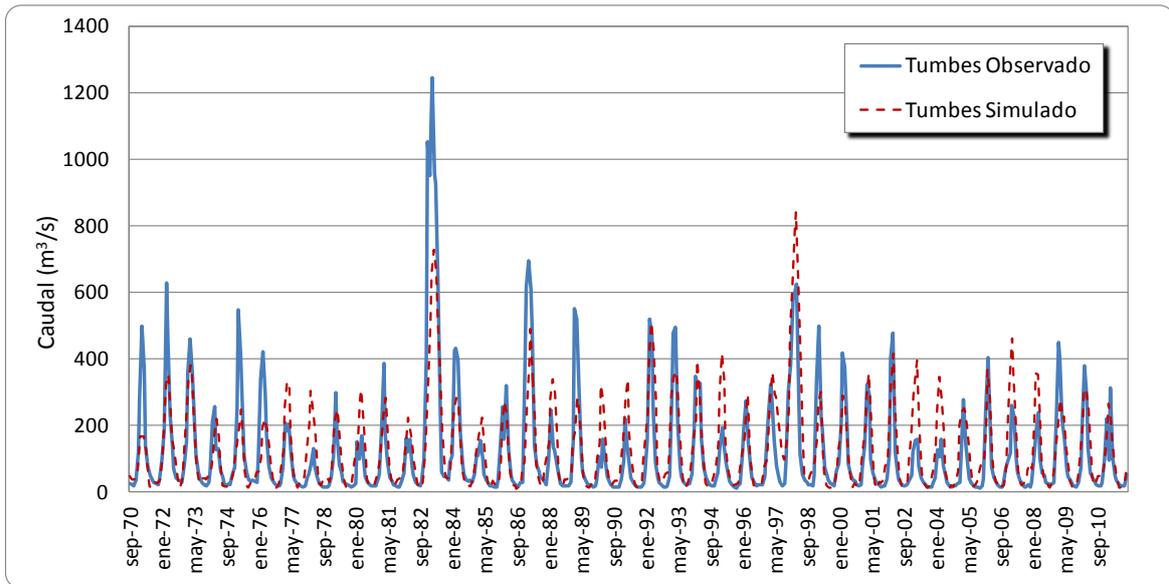


Figura 12. Caudal del río Tumbes simulado con el modelo de regresión

Fuente: Elaboración propia

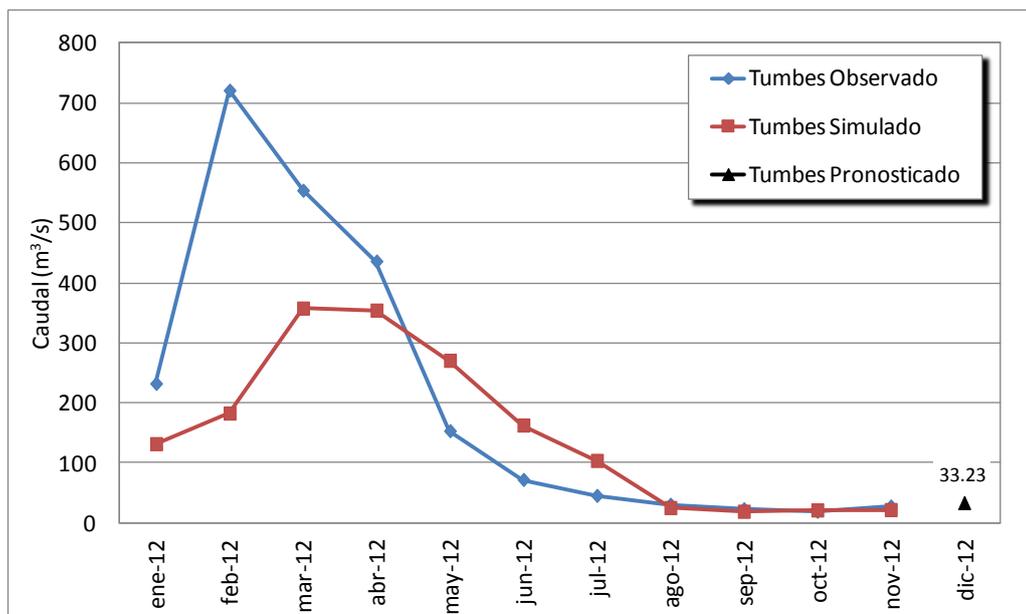


Figura 13. Validación del caudal simulado del río Tumbes y pronóstico para Diciembre 2012

Fuente: Elaboración propia

5.2 Estación Sánchez Cerro

Se realizó las correlaciones (**Tabla 6**) de los principales índices climáticos del Pacífico con el caudal medio mensual del río Piura medido en la estación Sánchez Cerro. También se consideró en el análisis el caudal medio del río Piura con desfase de un mes (S Cerro (-1)) así como la temperatura media de la estación San Miguel.

Tabla 6. Correlación del caudal medio del río Piura con los índices climáticos

	Lag -10	lag -9	Lag -8	Lag -7	Lag -6	Lag -5	Lag -4	Lag -3	Lag -2	Lag -1
SANCHEZ CERRO - MEI	0.208	0.249	0.261	0.251	0.241	0.236	0.250	0.269	0.281	0.302
SANCHEZ CERRO - SOI	-0.1208	-0.1481	-0.168	-0.180	-0.189	-0.191	-0.219	-0.259	-0.238	-0.219
SANCHEZ CERRO - PDO	0.050	0.086	0.117	0.087	0.027	-0.019	-0.020	0.015	0.050	0.101
SANCHEZ CERRO - ICEN	0.199	0.257	0.303	0.336	0.357	0.370	0.379	0.390	0.405	0.422
SANCHEZ CERRO - Nino 1+2	0.161	0.046	-0.052	-0.105	-0.098	-0.035	0.078	0.235	0.395	0.500
SANCHEZ CERRO - Nino 3	0.266	0.182	0.088	0.031	0.026	0.056	0.109	0.183	0.276	0.383
SANCHEZ CERRO - Nino 3+4	0.240	0.222	0.172	0.134	0.127	0.130	0.135	0.139	0.150	0.193
SANCHEZ CERRO - Nino 4	0.135	0.154	0.140	0.126	0.118	0.090	0.044	-0.016	-0.075	-0.096
SANCHEZ CERRO - SLP	0.232	0.334	0.368	0.329	0.221	0.070	-0.082	-0.186	-0.222	-0.174
SANCHEZ CERRO - S CERRO(-1)	0.042	-0.031	-0.065	-0.081	-0.080	-0.048	0.030	0.198	0.462	0.784
SANCHEZ CERRO - San Miguel	0.018	-0.090	-0.137	-0.121	-0.063	0.032	0.152	0.283	0.384	0.429

Fuente: Elaboración propia

Para la estación “Sánchez Cerro”, la mayor correlación se obtuvo con el mismo caudal medio mensual del río Piura con desfase de un mes (Lag-1), donde se obtuvo un valor de 0.784. También se ha encontrado que con un desfase de un mes (Lag-1) la correlación entre la temperatura del mar en la región niño1+2 y el caudal, fue de 0.5. Finalmente, también se obtuvo una buena correlación entre el caudal y la temperatura media de la estación San Miguel.

El periodo analizado para la estación Sánchez Cerro y los índices mensuales evaluados fue desde Febrero 1973 hasta Diciembre 2011, esto debido a que los datos de la estación San Miguel empiezan en Febrero de 1973.

A continuación se muestran algunos modelos de regresión evaluados para estimar el caudal en la estación Sánchez Cerro.

Tabla 7. Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros - Sánchez Cerro

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: scerro

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.231	139.778	1	465	.000	-727.501	33.453		
Logarítmica	.209	122.986	1	465	.000	-2284.580	743.198		
Inversa	.189	108.354	1	465	.000	760.437	-16358.5		
Cuadrático	.488	220.854	2	464	.000	7709.742	-690.551	15.387	
Cúbico	.517	248.779	2	464	.000	2453.556	.000	-14.650	.433
Compuesto ^a	.	.	.	.	.	.000	.000		
Potencia ^a	.	.	.	.	.	.000	.000		
S ^a	.	.	.	.	.	.000	.000		
Crecimiento ^a	.	.	.	.	.	.000	.000		
Exponencial ^a	.	.	.	.	.	.000	.000		
Logística ^a	.	.	.	.	.	.000	.000		

La variable independiente es snin12.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: SCerro

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.633	802.931	1	465	.000	10.252	.796		
Logarítmica ^a	.	.	.	.	.	.	.
Inversa ^b	.	.	.	.	.	.	.
Cuadrático	.634	401.341	2	464	.000	9.148	.841	-4.3E-005	
Cúbico	.636	269.180	3	463	.000	11.374	.697	.000	-2.0E-007
Compuesto ^c	.	.	.	.	.	.000	.000		
Potencia ^{c,a}	.	.	.	.	.	.000	.000		
S ^{c,b}	.	.	.	.	.	.000	.000		
Crecimiento ^c	.	.	.	.	.	.000	.000		
Exponencial ^c	.	.	.	.	.	.000	.000		
Logística ^c	.	.	.	.	.	.000	.000		

La variable independiente es SCerro1.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: scerro

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.184	105.038	1	465	.000	-592.578	26.761		
Logarítmica	.170	95.434	1	465	.000	-1915.226	619.347		
Inversa	.157	86.528	1	465	.000	647.585	-14193.2		
Cuadrático	.335	116.625	2	464	.000	6021.064	-524.689	11.371	
Cúbico	.352	126.285	2	464	.000	1973.277	.000	-11.132	.319
Compuesto ^a	.	.	.	.	.	.000	.000		
Potencia ^a	.	.	.	.	.	.000	.000		
S ^a	.	.	.	.	.	.000	.000		
Crecimiento ^a	.	.	.	.	.	.000	.000		
Exponencial ^a	.	.	.	.	.	.000	.000		
Logística ^a	.	.	.	.	.	.000	.000		

La variable independiente es smig.

Fuente: Elaboración propia

Se utilizó también la regresión múltiple, siendo la ecuación polinomial la que presentó un mayor ajuste en comparación con los demás modelos.

En la **Figura 14**, se muestra el análisis comparativo de los caudales observados y simulados, apreciándose una muy buena correlación especialmente para el período de estiaje.

Empleando la misma ecuación obtenida anteriormente, se realizó la validación del caudal del río Piura para el periodo de Enero a Julio 2012. La falta de datos de la estación San Miguel solo permitió validar la ecuación hasta Julio (**Figura 15**).

Lamentablemente debido a que el caudal del río Piura se seca en algunas épocas del año, este valor registrado de 0 en la serie de tiempo, genera valores negativos en varios modelos de regresión.

Para la selección del mejor modelo para el río Piura, se han considerado criterios como: Número de Nash, coeficiente de correlación, menor cantidad de números

negativos y la validación de la ecuación del modelo que se realizó con datos del año 2012. La ecuación que mostró mejor ajuste fue:

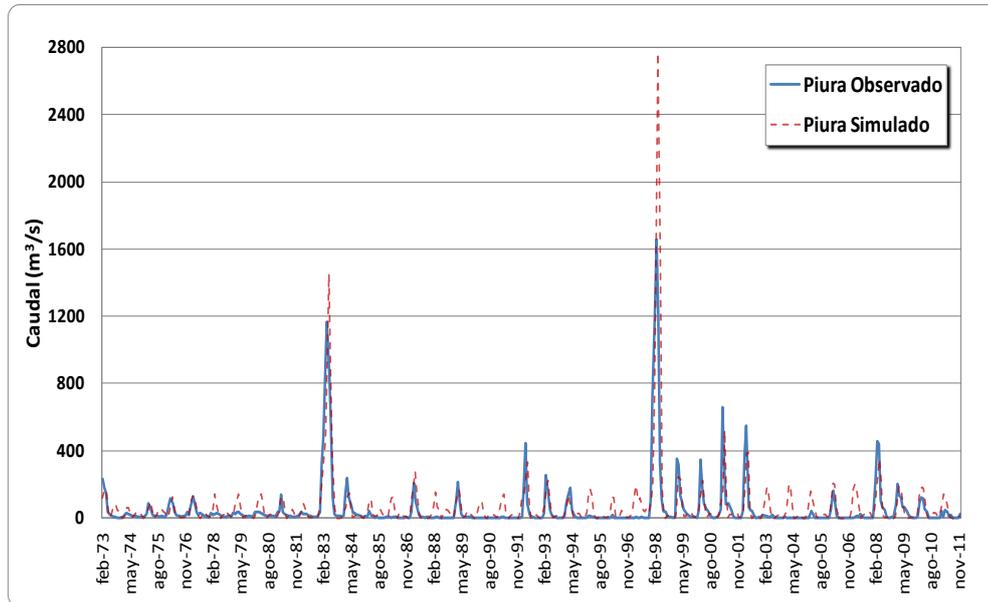


Figura 14. Caudal del río Piura simulado con el modelo de regresión
Fuente: Elaboración propia

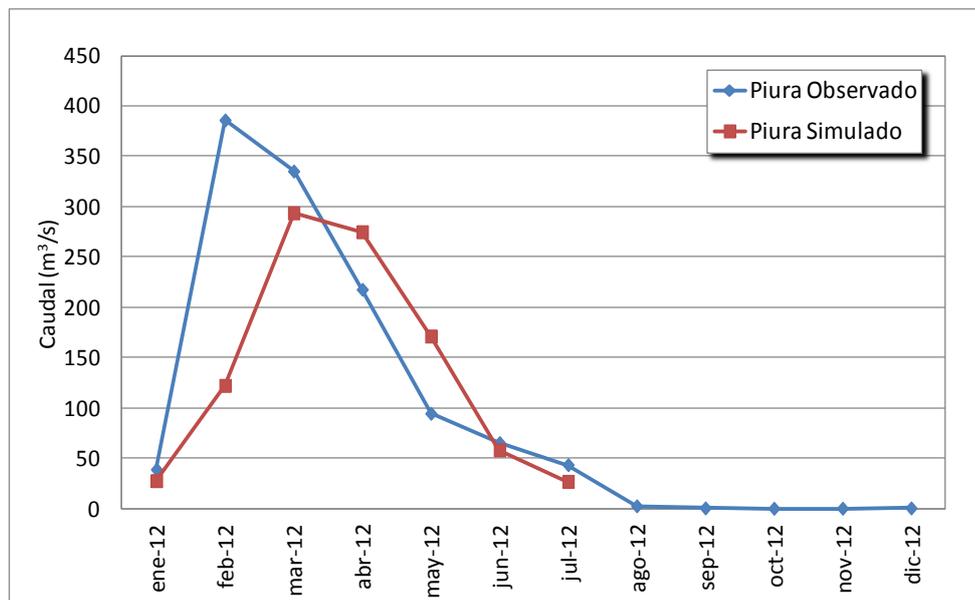


Figura 15. Validación del caudal simulado del río Piura
Fuente: Elaboración propia

$$Scerro = 856.7 + 0.0009 * (scerro_{(-1)})^2 - 2.435 * (smig)^2 + 0.0023 * (smig)^4 - 0.834 * (nino12)^2 + 0.0008 * (nino12)^4$$

5.3 Estación El Ciruelo

Se realizó las correlaciones (**Tabla 8**) de los principales índices climáticos del Pacífico con el caudal medio mensual del río Chira medido en la estación El Ciruelo. También se consideró en el análisis el caudal medio del río Chira con desfase de un mes.

Tabla 8. Correlación del caudal medio del río Chira con los índices climáticos

	Lag -10	Lag -9	Lag -8	Lag -7	Lag -6	Lag -5	Lag -4	Lag -3	Lag -2	Lag -1
CIRUELO - MEI	0.145	0.098	0.033	-0.016	-0.046	-0.057	-0.048	-0.038	-0.018	0.026
CIRUELO - SOI	-0.030	-0.027	-0.030	-0.027	-0.016	0.018	0.007	-0.001	0.034	0.026
CIRUELO - PDO	0.067	0.047	0.010	-0.079	-0.189	-0.251	-0.230	-0.171	-0.107	-0.045
CIRUELO - ICEN	0.1815	0.1874	0.183	0.171	0.155	0.143	0.145	0.159	0.176	0.190
CIRUELO - Nino 1+2	0.179	-0.073	-0.282	-0.398	-0.400	-0.290	-0.082	0.194	0.463	0.623
CIRUELO - Nino 3	0.372	0.144	-0.095	-0.260	-0.324	-0.218	-0.233	-0.096	0.107	0.338
CIRUELO - Nino 3+4	0.319	0.204	0.045	-0.087	-0.168	-0.218	-0.240	-0.233	-0.170	-0.023
CIRUELO - Nino 4	0.109	0.127	0.098	0.052	-0.002	-0.082	-0.175	-0.279	-0.366	-0.369
CIRUELO - SLP	0.369	0.530	0.567	0.462	0.239	-0.054	-0.322	-0.496	-0.536	-0.409
CIRUELO - CIRUELO(-1)	0.222	-0.006	-0.165	-0.253	-0.274	-0.228	-0.114	0.075	0.367	0.728

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la **Tabla 8**, los índices climáticos que muestran la mayor correlación con el caudal son: la temperatura del mar en la región Niño12, la presión a nivel medio del mar (SLP) con desfase de 8 meses (Lag-8) y el caudal del río Chira con desfase de un mes (Lag-1).

Tabla 9. Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros - El Ciruelo

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Cir

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.401	339.293	1	506	.000	-680.595	33.837		
Logarítmica	.388	321.320	1	506	.000	-2332.539	776.236		
Inversa	.374	302.622	1	506	.000	871.111	-17621.2		
Cuadrático	.443	200.770	2	505	.000	1933.362	-190.783	4.780	
Cúbico	.444	201.422	2	505	.000	448.196	.000	-3.337	.114
Compuesto	.576	686.195	1	506	.000	.050	1.363		
Potencia	.574	682.860	1	506	.000	9.45E-009	7.221		
S	.570	671.996	1	506	.000	11.435	-166.428		
Crecimiento	.576	686.195	1	506	.000	-2.997	.310		
Exponencial	.576	686.195	1	506	.000	.050	.310		
Logística	.576	686.195	1	506	.000	20.021	.733		

La variable independiente esnino12.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Cir

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.352	274.620	1	506	.000	-158.566	26.419		
Logarítmica	.296	212.798	1	506	.000	-392.524	220.287		
Inversa	.232	153.026	1	506	.000	282.011	-1615.147		
Cuadrático	.444	201.827	2	505	.000	291.569	-73.881	5.152	
Cúbico	.450	137.371	3	504	.000	-42.824	42.609	-7.548	.438
Compuesto	.523	555.630	1	506	.000	5.699	1.280		
Potencia	.470	449.127	1	506	.000	.550	2.124		
S	.394	328.469	1	506	.000	5.962	-16.087		
Crecimiento	.523	555.630	1	506	.000	1.740	.247		
Exponencial	.523	555.630	1	506	.000	5.699	.247		
Logística	.523	555.630	1	506	.000	.175	.782		

La variable independiente esslp.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Cir

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.531	572.847	1	506	.000	28.745	.728		
Logarítmica	.482	470.801	1	506	.000	-275.228	90.614		
Inversa	.239	159.123	1	506	.000	174.225	-3161.564		
Cuadrático	.560	321.501	2	505	.000	5.375	1.147	-.001	
Cúbico	.562	215.201	3	504	.000	12.248	.972	-6.0E-005	-7.5E-007
Compuesto	.502	509.644	1	506	.000	37.846	1.005		
Potencia	.653	950.945	1	506	.000	2.259	.807		
S	.472	453.054	1	506	.000	4.943	-33.986		
Crecimiento	.502	509.644	1	506	.000	3.634	.005		
Exponencial	.502	509.644	1	506	.000	37.846	.005		
Logística	.502	509.644	1	506	.000	.026	.995		

La variable independiente es Cir1.

Fuente: Elaboración propia

En las **Figuras 16 y 17**, se muestra el análisis comparativo de los caudales observados y simulados, apreciándose una muy buena correlación especialmente para el período de estiaje.

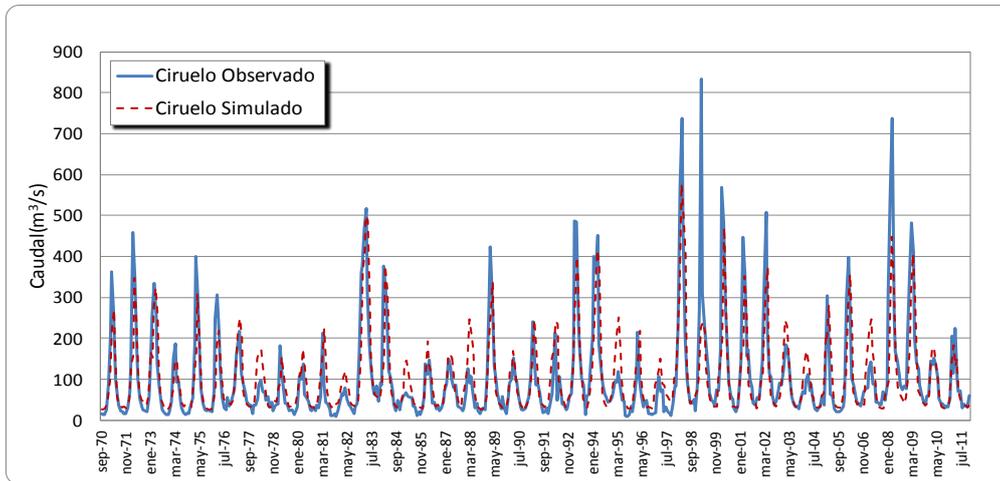


Figura 16. Caudal del río Chira simulado con el modelo de regresión
Fuente: Elaboración propia

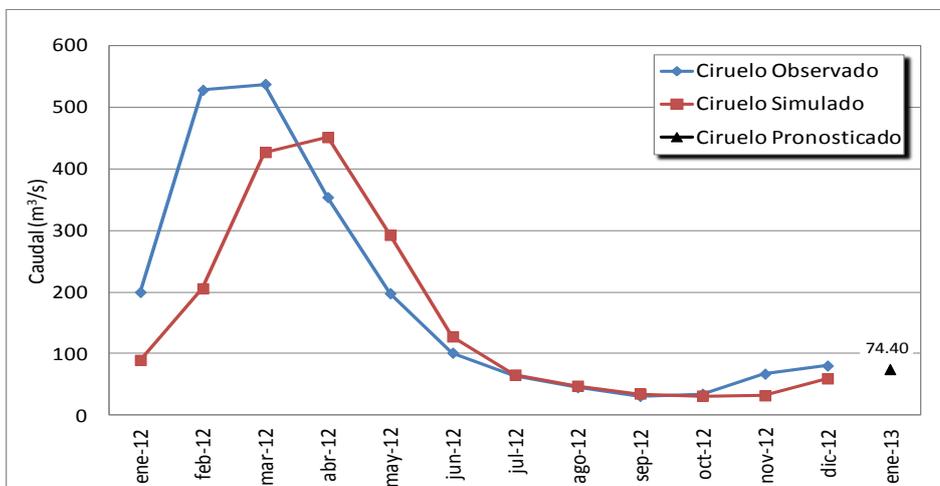


Figura 17. Validación del caudal simulado del río Chira y pronóstico para Enero 2013
Fuente: Elaboración propia

Para la selección del mejor modelo para generar el caudal del río Chira, se han considerado criterios como: Número de Nash, coeficiente de correlación, y la validación de la ecuación del modelo que se realizó con datos del año 2012.

$$Ciruelo = 61.7 - 0.13 * (nino12)^2 + 0.00023 * (nino12)^4 - 0.69 * (slp)^2 + 0.00634 * (slp)^4 + 0.00154 * (Cir_{-1})^2 - 2 * 10^{-9} * (Cir_{-1})^4$$

5.4 Estación Racarumi

Se realizó las correlaciones (**Tabla 10**) de los principales índices climáticos del Pacífico con el caudal medio mensual del río Chancay Lambayeque medido en la estación hidrológica Racarumi.

Tabla 10. Correlación del caudal medio del río Chancay Lambayeque con los Índices climáticos

	Lag -10	Lag -9	Lag -8	Lag -7	Lag -6	Lag -5	Lag -4	Lag -3	Lag -2	Lag -1
RACARUMI - MEI	0.105	0.072	0.026	-0.015	-0.051	-0.076	-0.095	-0.102	-0.080	-0.037
RACARUMI - SOI	0.011	0.010	-0.010	-0.021	0.002	0.038	0.011	0.018	0.043	0.069
RACARUMI - PDO	0.14546	0.13271	0.081	-0.014	-0.126	-0.231	-0.251	-0.172	-0.099	-0.041
RACARUMI - ICEN	0.11603	0.11026	0.102	0.092	0.082	0.072	0.067	0.074	0.085	0.095
RACARUMI - Nino 1+2	0.331	0.063	-0.214	-0.423	-0.523	-0.489	-0.308	-0.012	0.326	0.577
RACARUMI - Nino 3	0.447	0.244	0.000	-0.204	-0.338	-0.407	-0.399	-0.282	-0.058	0.231
RACARUMI - Nino 3+4	0.312	0.233	0.103	-0.014	-0.115	-0.204	-0.288	-0.323	-0.273	-0.119
RACARUMI - Nino 4	0.053	0.095	0.101	0.107	0.090	0.033	-0.086	-0.230	-0.348	-0.394
RACARUMI - SLP	0.225	0.474	0.614	0.606	0.431	0.125	-0.195	-0.472	-0.617	-0.588
RACARUMI - RACA(-1)	0.192	-0.061	-0.245	-0.349	-0.382	-0.323	-0.206	0.010	0.294	0.653

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla 10, los índices climáticos que muestran la mayor correlación con el caudal son: (1) la temperatura del mar en la región Niño12, se obtuvo una correlación de 0.577; (2) la presión a nivel medio del mar (SLP) con un desfase de 8 meses (Lag-8) se obtuvo una correlación de 0.614 y (3) la correlación del caudal del río Chancay Lambayeque con su misma serie, se encontró una correlación de 0.653 con el desfase de un mes (Lag-1).

En una primera aproximación, se estimaron los parámetros de los modelos para cada una de las 3 variables independientes: Niño12, SLP y Raca₋₁.

El resumen de estos modelos se puede ver en la **Tabla 11**. Se puede observar también de esta tabla, que las variables Niño12 y SLP muestran mejores resultados para las ecuaciones cuadráticas y cúbicas; en el caso de la variable Raca₋₁ el mejor resultado se obtuvo con una ecuación potencial.

En las **Figuras 18 y 19**, se muestra el análisis comparativo de los caudales observados y simulados, apreciándose una muy buena correlación especialmente para el período de estiaje.

Tabla 11 Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros para Racarumi**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: raca

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.302	214.220	1	494	.000	-143.529	7.650		
Logarítmica	.292	203.426	1	494	.000	-515.955	175.163		
Inversa	.280	191.745	1	494	.000	206.472	-3964.839		
Cuadrático	.337	125.183	2	493	.000	470.491	-45.123	1.123	
Cúbico	.335	124.425	2	493	.000	254.476	-18.044	.000	.015
Compuesto	.292	203.592	1	494	.000	.143	1.245		
Potencia	.283	195.370	1	494	.000	3.21E-006	5.026		
S	.273	185.797	1	494	.000	8.097	-114.114		
Crecimiento	.292	203.592	1	494	.000	-1.944	.219		
Exponencial	.292	203.592	1	494	.000	.143	.219		
Logística	.292	203.592	1	494	.000	6.985	.804		

La variable independiente esrino12.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Raca

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.370	290.066	1	494	.000	-36.628	7.080		
Logarítmica	.315	226.994	1	494	.000	-100.169	59.399		
Inversa	.249	163.491	1	494	.000	81.873	-437.065		
Cuadrático	.447	199.533	2	493	.000	70.765	-16.817	1.227	
Cúbico	.448	133.063	3	492	.000	42.927	-7.124	.170	.036
Compuesto	.431	373.866	1	494	.000	2.493	1.249		
Potencia	.386	310.978	1	494	.000	.303	1.915		
S	.321	233.764	1	494	.000	4.716	-14.461		
Crecimiento	.431	373.866	1	494	.000	.914	.222		
Exponencial	.431	373.866	1	494	.000	2.493	.222		
Logística	.431	373.866	1	494	.000	.401	.801		

La variable independiente esslp.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Raca

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.421	359.150	1	494	.000	12.046	.648		
Logarítmica	.393	320.009	1	494	.000	-33.269	21.513		
Inversa	.221	140.179	1	494	.000	49.546	-236.371		
Cuadrático	.433	187.885	2	493	.000	7.153	.950	-.003	
Cúbico	.433	125.385	3	492	.000	5.597	1.102	-.005	1.40E-005
Compuesto	.430	372.830	1	494	.000	12.020	1.019		
Potencia	.523	542.054	1	494	.000	2.394	.722		
S	.385	309.900	1	494	.000	3.729	-9.087		
Crecimiento	.430	372.830	1	494	.000	2.487	.019		
Exponencial	.430	372.830	1	494	.000	12.020	.019		
Logística	.430	372.830	1	494	.000	.083	.981		

La variable independiente esRaca1.

Fuente: Elaboración propia

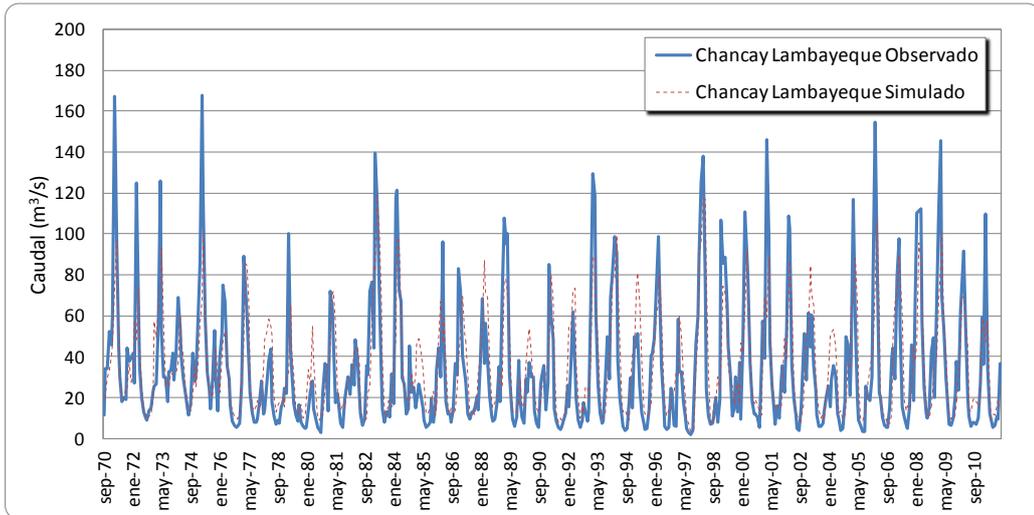


Figura 18. Caudal del río Chancay-Lambayeque simulado con el modelo de regresión
 Fuente: Elaboración propia

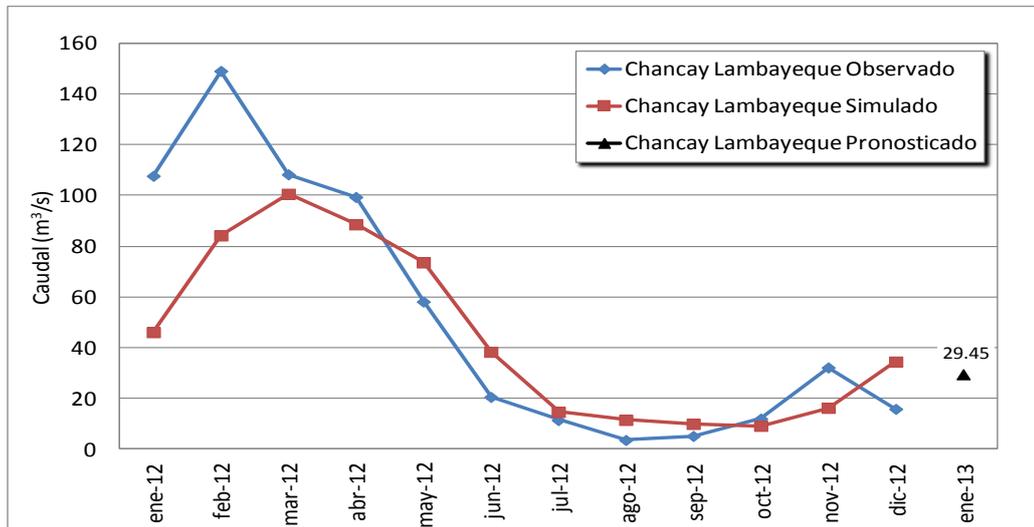


Figura 19. Validación del caudal simulado del río Chancay-Lambayeque y pronóstico para enero 2013
 Fuente: Elaboración propia

En la simulación del caudal del río Chancay-Lambayeque, se ha considerado un modelo polinomial de grado 4 que se indica a continuación:

$$Raca = 467.9 - 60.6 * (nino12) + 2 * (nino12)^2 - 0.021 * (nino12)^3 + 60.7 * (slp) - 11.4 * (slp)^2 + 0.86 * (slp)^3 - 0.022 * (slp)^4 + 0.7 * (raca_{-1}) - 0.0052 * (raca_{-1})^2 + 1.8 * 10^{-5} * (raca_{-1})^3 + 1.1 * 10^{-8} * (raca_{-1})^4$$

5.5 Estación Puchaca

Se realizó las correlaciones (**Tabla 12**) de los principales índices climáticos del Pacífico con el caudal medio mensual del río La Leche medido en la estación hidrológica Puchaca.

Tabla 12. Correlación del caudal medio del río La Leche con los índices climáticos

	Lag -10	Lag -9	Lag -8	Lag -7	Lag -6	Lag -5	Lag -4	Lag -3	Lag -2	Lag -1
PUCHACA - MEI	0.172	0.210	0.215	0.196	0.170	0.149	0.146	0.155	0.170	0.196
PUCHACA - SOI	-0.085	-0.103	-0.112	-0.116	-0.118	-0.091	-0.105	-0.130	-0.148	-0.145
PUCHACA - PDO	0.094	0.119	0.139	0.097	0.025	-0.041	-0.063	-0.041	-0.008	0.050
PUCHACA - ICEN	0.205	0.261	0.302	0.327	0.336	0.337	0.338	0.337	0.329	0.317
PUCHACA - Nino 1+2	0.218	0.090	-0.028	-0.112	-0.139	-0.100	0.005	0.166	0.335	0.453
PUCHACA - Nino 3	0.282	0.201	0.096	0.014	-0.023	-0.022	0.011	0.076	0.177	0.304
PUCHACA - Nino 3+4	0.221	0.211	0.158	0.109	0.083	0.065	0.046	0.034	0.047	0.100
PUCHACA - Nino 4	0.098	0.125	0.113	0.104	0.100	0.074	0.016	-0.056	-0.121	-0.152
PUCHACA - SLP	0.196	0.322	0.380	0.366	0.264	0.097	-0.079	-0.215	-0.276	-0.245
PUCHACA - PUCHACA-1	0.057	-0.034	-0.089	-0.106	-0.108	-0.088	-0.018	0.161	0.437	0.753

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la **Tabla 12**, los índices climáticos que muestran la mayor correlación con el caudal son: (1) la temperatura del mar en la región Niño12 con desfase de un mes (Lag-1) obtuvo una correlación de 0.453; (2) la presión a nivel medio del mar (SLP) con desfase de 8 meses (Lag-8) obtuvo una correlación de 0.38 y (3) la correlación del caudal del río Chancay Lambayeque con su misma serie desfasada un mes (Lag-1) tuvo una correlación de 0.753.

En una primera aproximación, se estimaron los parámetros de los modelos para cada una de las 3 variables independientes: Niño12, SLP y Puchaca₁. Se puede observar de la **Tabla 13**, que las variables Niño12 y Puchaca₁ muestran mejores resultados para las ecuaciones cuadráticas y cúbicas; en el caso de la variable SLP el mejor resultado se obtuvo con una ecuación exponencial.

Tabla 13. Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros para Puchaca

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Pucha

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	ql1	ql2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.200	120.355	1	482	.000	-55.962	2.699		
Logarítmica	.184	108.646	1	482	.000	-182.998	60.413		
Inversa	.169	97.967	1	482	.000	64.924	-1338.886		
Cuadrático	.347	127.721	2	481	.000	494.229	-44.568	1.006	
Cúbico	.361	136.093	2	481	.000	154.221	.000	-.929	.028
Compuesto	.300	206.864	1	482	.000	.002	1.358		
Potencia	.290	197.204	1	482	.000	8.04E-010	7.023		
S	.279	186.551	1	482	.000	8.037	-159.232		
Crecimiento	.300	206.864	1	482	.000	-5.996	.306		
Exponencial	.300	206.864	1	482	.000	.002	.306		
Logística	.300	206.864	1	482	.000	401.790	.736		

La variable independiente es Niño12.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Pucha

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	ql1	ql2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.568	634.340	1	482	.000	1.663	.754		
Logarítmica	.235	148.419	1	482	.000	.889	5.244		
Inversa	.004	2.179	1	482	.141	6.933	-.188		
Cuadrático	.572	321.743	2	481	.000	2.252	.625	.001	
Cúbico	.576	217.252	3	480	.000	1.654	.814	-.005	3.30E-005
Compuesto	.260	168.937	1	482	.000	2.226	1.048		
Potencia	.507	496.630	1	482	.000	1.380	.712		
S	.038	19.289	1	482	.000	1.167	-.051		
Crecimiento	.260	168.937	1	482	.000	.800	.047		
Exponencial	.260	168.937	1	482	.000	2.226	.047		
Logística	.260	168.937	1	482	.000	.449	.954		

La variable independiente es Pucha1.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Pucha

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	ql1	ql2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.153	87.092	1	482	.000	-13.168	1.987		
Logarítmica	.122	66.827	1	482	.000	-29.905	16.188		
Inversa	.090	47.625	1	482	.000	19.336	-115.689		
Cuadrático	.235	73.912	2	481	.000	35.629	-8.823	.553	
Cúbico	.259	55.995	3	480	.000	-43.336	18.564	-2.423	.102
Compuesto	.332	239.733	1	482	.000	.202	1.311		
Potencia	.287	194.280	1	482	.000	.017	2.301		
S	.228	142.040	1	482	.000	2.971	-17.032		
Crecimiento	.332	239.733	1	482	.000	-1.597	.271		
Exponencial	.332	239.733	1	482	.000	.202	.271		
Logística	.332	239.733	1	482	.000	4.940	.763		

La variable independiente esslp.

Fuente: Elaboración propia

También se intentó el ajuste del caudal con modelos de regresión polinomial de segundo y tercer grado, lo cual mostró una mejora como se ve en la **Figura 20**.

En las **Figuras 20 y 21**, se muestra el análisis comparativo de los caudales observados y simulados, apreciándose una muy buena correlación especialmente para el período de estiaje.

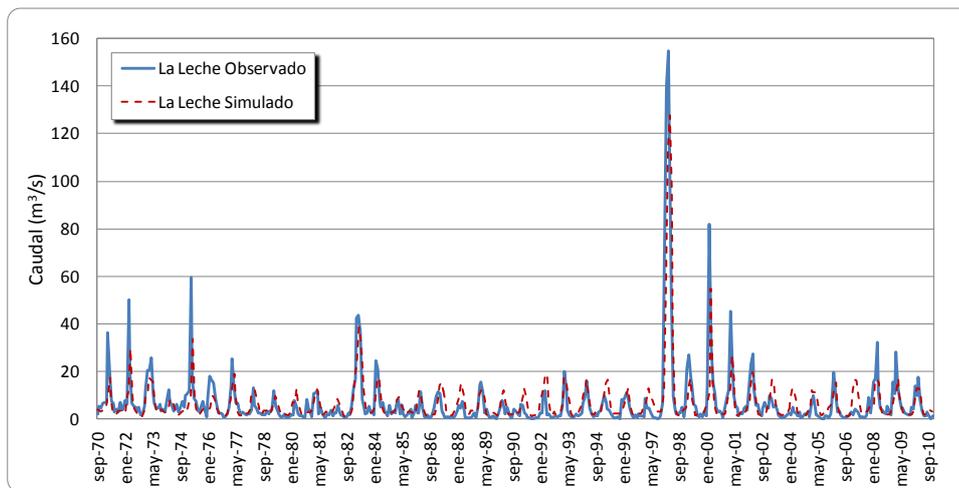
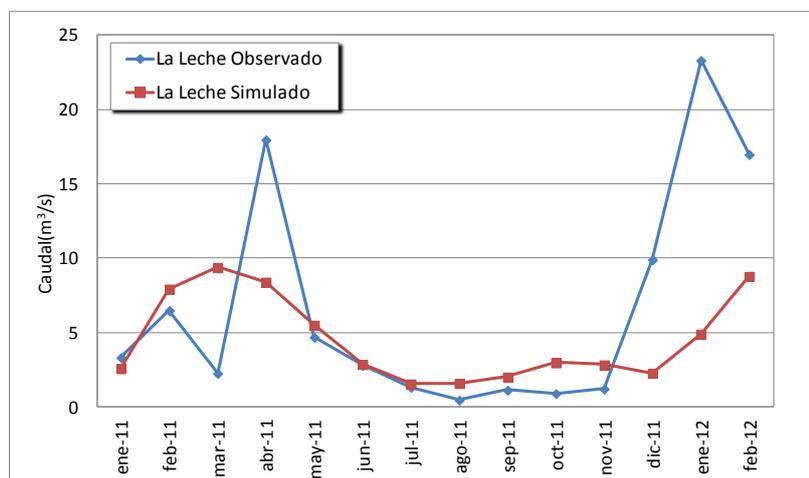


Figura 20. Caudal del río La Leche simulado con el modelo de regresión

Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Validación del caudal simulado del río La Leche

Fuente: elaboración propia



El modelo que mejor representó el caudal observado del río La Leche medido en la estación Puchaca, fue el modelo polinomial de tercer grado que se indica a continuación:

$$Pucha = 50.8 - 0.286 * (nino12)^2 + 0.0085 * (nino12)^3 - 0.095 * (slp)^2 + 0.0092 * (slp)^3 + 0.0088 * (Pucha_{-1})^2 - 0.00003 * (Pucha_{-1})^3$$

5.6 Estación Yonán

Se realizó las correlaciones de los principales índices climáticos del Pacífico con el caudal medio mensual del río Jequetepeque medido en la estación hidrológica Yonán obteniendo la **Tabla 14** que se muestra a continuación:

Tabla 14. Correlación del caudal medio del río Jequetepeque con los índices climáticos

	Lag -10	Lag -9	Lag -8	Lag -7	Lag -6	Lag -5	Lag -4	Lag -3	Lag -2	Lag -1
YONAN - MEI	0.148	0.137	0.093	0.044	0.008	-0.022	-0.039	-0.041	-0.033	0.000
YONAN - SOI	-0.027	-0.038	-0.055	-0.047	-0.025	0.003	-0.001	-0.011	0.010	0.039
YONAN - PDO	0.120	0.110	0.082	0.004	-0.108	-0.197	-0.189	-0.117	-0.061	-0.009
YONAN - ICEN	0.173	0.192	0.201	0.198	0.186	0.169	0.158	0.159	0.162	0.163
YONAN - Nino 1+2	0.335	0.096	-0.148	-0.329	-0.412	-0.384	-0.236	0.019	0.324	0.558
YONAN - Nino 3	0.450	0.274	0.043	-0.149	-0.262	-0.312	-0.297	-0.197	-0.016	0.229
YONAN - Nino 3+4	0.314	0.258	0.131	0.007	-0.083	-0.152	-0.212	-0.239	-0.215	-0.100
YONAN - Nino 4	0.060	0.116	0.116	0.101	0.075	0.023	-0.074	-0.195	-0.315	-0.375
YONAN - SLP	0.219	0.449	0.577	0.564	0.407	0.138	-0.157	-0.410	-0.549	-0.536
YONAN - YONAN-1	0.170	-0.057	-0.186	-0.265	-0.295	-0.254	-0.146	0.049	0.291	0.663

Fuente: Elaboración propia

En la **Tabla 14**, se observa que los índices climáticos que tienen mayor correlación con el caudal son: (1) la temperatura del mar en la región Niño12 con desfase de un mes (Lag-1) obtuvo una correlación de 0.558; (2) la presión a nivel medio del mar (SLP) con desfase de 8 meses (Lag-8) obtuvo una correlación de 0.577 (3) la temperatura del mar en la región niño3 con desfase de 10 meses (Lag-10) obtuvo una correlación de 0.45 y (4) la correlación del caudal del río Jequetepeque con su misma serie desfasada un mes (Lag-1) tuvo una correlación de 0.663

En una primera aproximación, se estimaron los parámetros de los modelos para cada una de las 4 variables independientes: Niño12, Niño3, SLP y Yonan₋₁. Se puede observar de la **Tabla 15**, que las variables Niño12 y Yonan₋₁ muestran mejores resultados para las ecuaciones cuadráticas y cúbicas; en el caso de la variable SLP el mejor resultado se obtuvo con una ecuación exponencial. El aporte de la variable Niño3 es muy bajo por lo cual no fue considerado en el modelo.

En las **Figuras 22 y 23**, se muestra el análisis comparativo de los caudales observados y simulados, apreciándose una muy buena correlación especialmente

para el período de estiaje.

Tabla 15. Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros para Yonán

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Yonán

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.287	178.766	1	444	.000	-189.737	9.398		
Logarítmica	.275	167.998	1	444	.000	-645.920	214.761		
Inversa	.261	157.020	1	444	.000	239.524	-4854.317		
Cuadrático	.341	114.831	2	443	.000	786.624	-74.336	1.778	
Cúbico	.341	114.830	2	443	.000	455.546	-32.171	.000	.025
Potencia ^a	.	.	.	.	.	.000	.000		

La variable independiente esnino12.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Yonán

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.316	204.732	1	444	.000	-54.769	8.306		
Logarítmica	.264	159.012	1	444	.000	-128.955	69.531		
Inversa	.204	114.019	1	444	.000	84.019	-510.286		
Cuadrático	.406	151.687	2	443	.000	95.316	-24.831	1.691	
Cúbico	.413	103.491	3	442	.000	-20.389	15.164	-2.642	.149
Potencia ^a	.	.	.	.	.	.000	.000		

La variable independiente esslp.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Yonán

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.193	106.040	1	444	.000	-322.168	13.526		
Logarítmica	.190	104.323	1	444	.000	-1105.616	348.528		
Inversa	.187	102.399	1	444	.000	374.484	-8947.886		
Cuadrático	.201	55.803	2	443	.000	946.084	-84.275	1.881	
Cúbico	.201	55.725	2	443	.000	508.391	-34.523	.000	.024
Potencia ^a	.	.	.	.	.	.000	.000		

La variable independiente esnino3.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: Yonán

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.436	343.769	1	444	.000	9.726	.661		
Logarítmica ^a	.	.	.	.	.	.	.
Inversa ^b	.	.	.	.	.	.	.
Cuadrático	.450	181.164	2	443	.000	5.866	.954	-0.002	
Cúbico	.463	127.131	3	442	.000	1.712	1.464	-0.010	3.02E-005
Potencia ^{c,a}	.	.	.	.	.	.000	.000		

La variable independiente esyonan1.

Fuente: elaboración propia

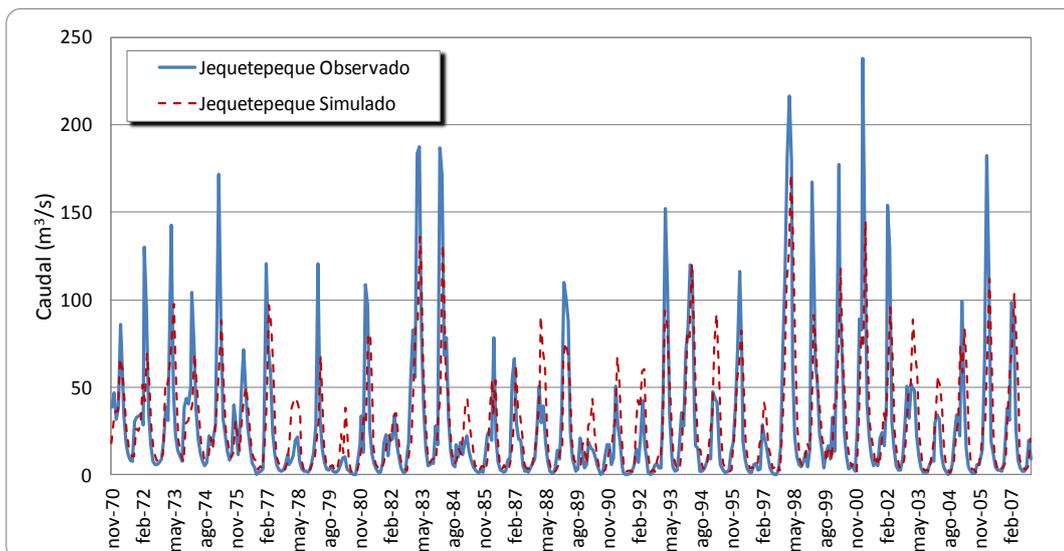


Figura 22. Caudal del río Jequetepeque simulado con el modelo de regresión
Fuente: Elaboración propia

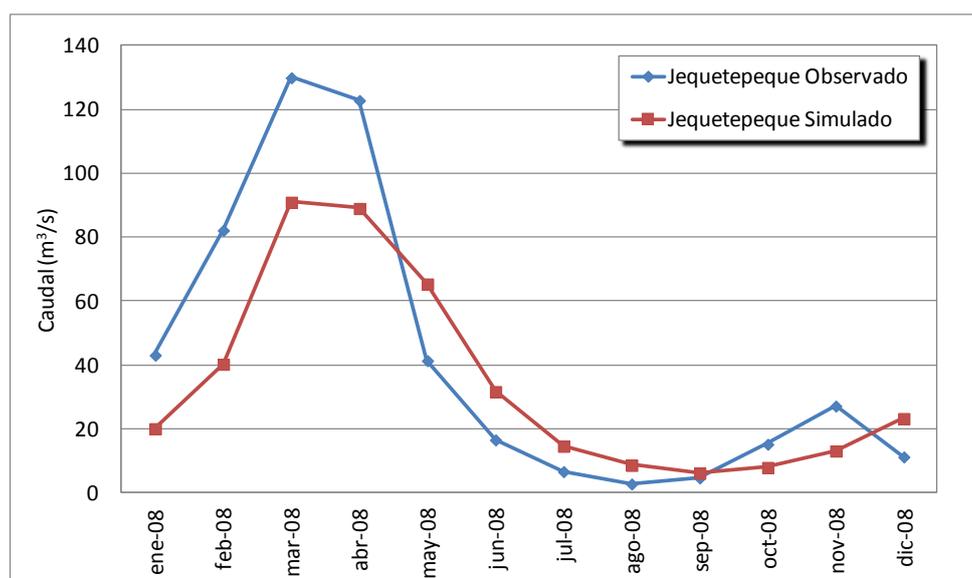


Figura 23. Validación del caudal simulado del río Jequetepeque
Fuente: Elaboración propia

El modelo que mejor representó el caudal observado del río Jequetepeque, medido en la estación Yonán, fue el modelo polinomial de tercer grado que se indica a continuación:

$$Yonan = -22.95 + 14.14 * (slp) - 2.37 * (slp)^2 + 0.12 * (slp)^3 + 0.95 * (Yonan_{-1}) - 0.0066 * (Yonan_{-1})^2 + 0.00002 * (Yonan_{-1})^3$$

VI.- CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

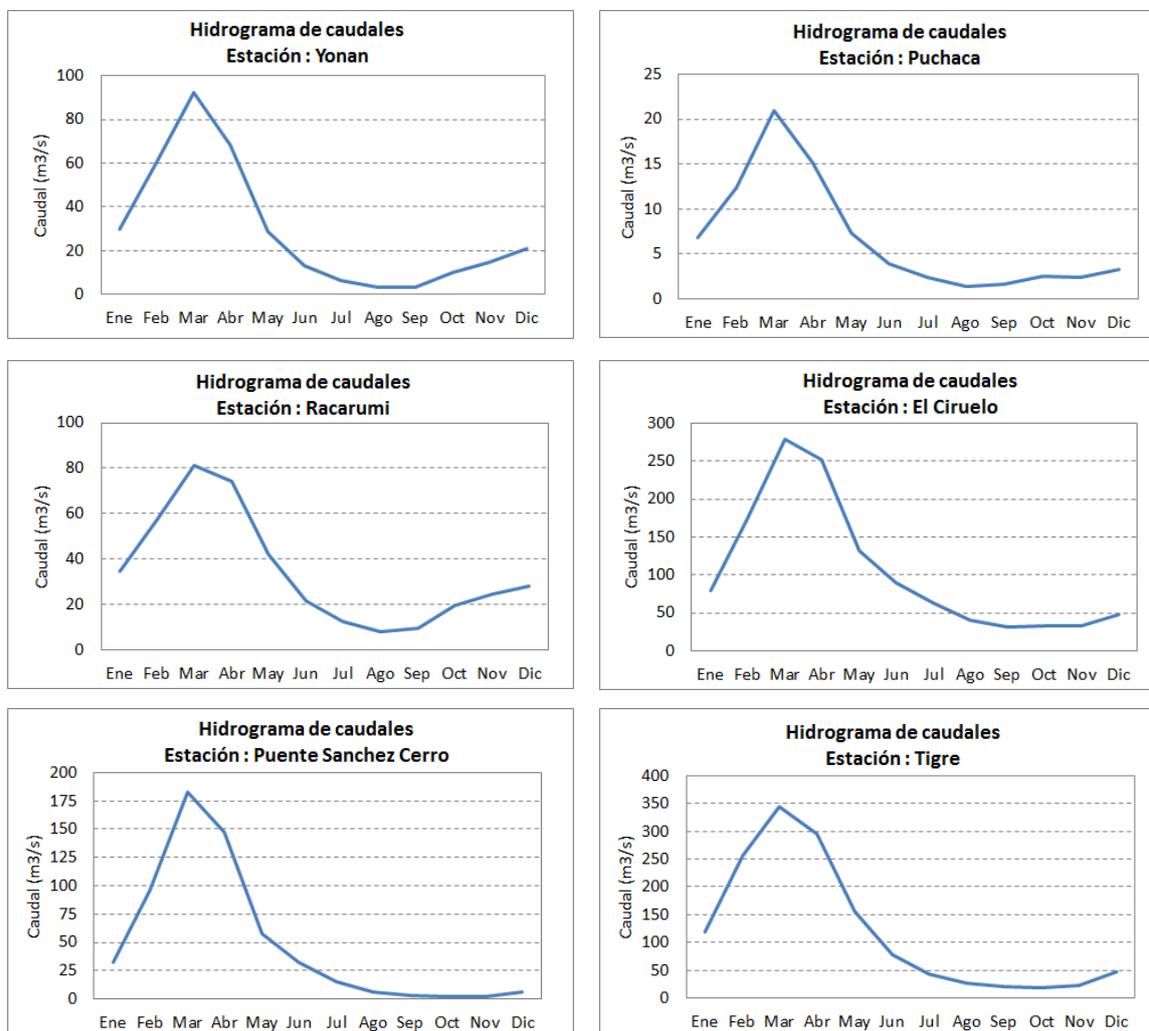
- Los caudales de los 6 ríos evaluados han sido ajustados a ecuaciones polinómicas que han podido representar adecuadamente los caudales observados; sin embargo en algunos ríos donde el caudal es cero o presenta valores muy bajos en algunas épocas del año como es el caso del río Piura, encontrar el modelo más adecuado ha requerido de un mayor análisis. Tal es así que para este río se tuvo que recurrir a la búsqueda de alguna estación costera que tenga registros largos de temperatura media del aire y muestre cierta correlación con el caudal, es así que se encontró y consideró la estación San Miguel como predictor del caudal del río Piura.
- De todas las variables climáticas consideradas en este estudio, las que han tenido mayor importancia en el pronóstico del caudal han sido la temperatura del mar en la región niño¹² con desfase de un mes (lag-1) y la presión al nivel medio del mar con desfase de 8 y 7 meses (lag-8 y lag-7). El caudal observado con desfase de un mes (lag-1) también ha mostrado ser una variable que puede ser utilizado como predictor del caudal futuro.
- Para la selección del mejor modelo también se consideró el periodo de validación que en este estudio considera los doce últimos meses de información observada.
- El modelo con mejor ajuste en el periodo de simulación fue el del río Chira, mientras que para el periodo de validación el mejor ajuste se obtuvo en el río Jequetepeque.
- Se han obtenido valores del coeficiente de correlación R mayores a 0.73 en la simulación como en la validación. En cuanto al número de NASH este ha sido variable; para la simulación el NASH fluctuó entre 0.38 y 0.65 mientras que para la validación fluctuó entre 0.15 y 0.72
- El modelo que presentó mejor ajuste tanto en el periodo de simulación como en la validación fue el del río Jequetepeque con datos medidos en la estación Yonán.

6.2 Recomendaciones

- Las ecuaciones polinómicas encontradas en este estudio deben ser validadas mes a mes con el fin de poder medir su grado de acierto.
- Es recomendable analizar otras estaciones costeras que tengan un largo registro de la temperatura media, para encontrar alguna correlación entre esta variable y el caudal medido en la estación hidrológica.
- Se recomienda ampliar este estudio, analizando la correlación entre los índices climáticos y el caudal de estaciones hidrológicas ubicadas en la costa central o costa sur del Perú.

VII.- ANEXOS

A1. Hidrograma de caudales normales



A2. Estadísticas de la simulación y validación

	Simulación		Validación	
	COEF. R	NASH	COEF. R	NASH
Tumbes	0.7891	0.6168	0.9374	0.3997
Chira	0.8063	0.6500	0.8012	0.6105
Piura	0.7874	0.3837	0.7962	0.4952
Chancay-Lambayeque	0.7461	0.5537	0.8532	0.6685
La Leche	0.7805	0.6091	0.9391	0.1540
Jequetepeque	0.7329	0.5369	0.8946	0.7236