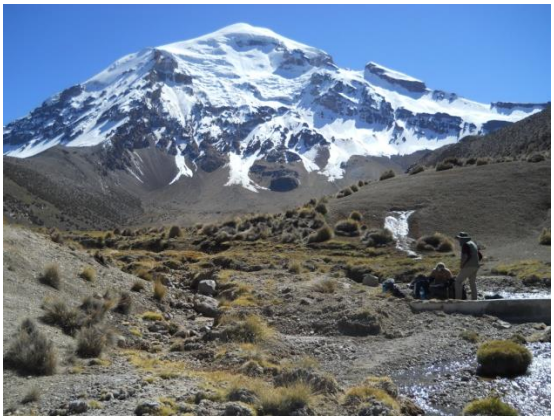
TENDENCIAS CLIMÁTICAS (TIEMPO PRESENTE) EN LA CUENCA DEL RÍO SAJAMA



INFORME DE AVANCE

Dr. Ing. Freddy Soria Céspedes

CONSULTOR INDEPENDIENTE, ONG AGUA SUSTENTABLE

La Paz, 15 de diciembre de 2013

CONTENIDO

	Página
1 INTRODUCCIÓN	3
2 ANÁLISIS DE CONSISTENCIA Y ANÁLISIS DE TENDENCIAS	3
3 RESULTADOS	4
3.1 Análisis de consistencia a escala anual de la precipitación total	4
3.2 Series anuales y tendencias de las series de precipitación	14
3.3 Consistencia y tendencias a escala anual de la temperatura media del aire, humedad relativa media del aire, velocidad del viento y evaporación de tanque	19
3.3.1 Temperatura media del aire. Consistencia y tendencias	19
3.3.2 Humedad relativa media del aire. Consistencia y tendencias	23
3.3.3 Series anuales de velocidad media del viento. Consistencia y tendencias	27
3.3.4 Series anuales de evaporación de tanque. Consistencia y tendencias	27
5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	31
AGRADECIMIENTOS	31
6 REFERENCIAS	32

TENDENCIAS DEL CLIMA PRESENTE EN LA CUENCA DEL RÍO SAJAMA

Freddy Soria Céspedes

1. INTRODUCCIÓN

El estudio nace en la necesidad de entender la variabilidad histórica a escala anual, de la precipitación, la temperatura media del aire, la velocidad media del viento, la humedad relativa media del aire y la evaporación de tanque en la región del Parque Nacional Sajama y las cuencas vecinas. La motivación de ampliar el área de análisis desde la cuenca del río Sajama hacia cuencas que se desarrollan hacia el norte, oeste y sur del sitio de estudio, yace en la limitada disponibilidad de información originada en la remota ubicación de la cuenca y la inherente demanda de generar herramientas para regionalizar la información existente. El estudio de tendencias busca complementar el estudio agroclimático de García (2012), que estuvo enfocado en la región del Parque Nacional Sajama. El estudio puede considerarse también como un elemento para actualizar parcialmente estudios de balance hídrico realizados en tesis de grado en la zona de estudios; sin embargo, los objetivos del mismo no se restringen a los dos tipos de estudios mencionados.

En este estudio se analiza la información de estaciones situadas desde la parte sur de la cuenca del Lago Titicaca hasta la parte sur de la cuenca del Lago Poopó. En esta etapa, el análisis se realiza a escala anual, como insumo para el análisis a escala mensual de la información disponible en el tiempo presente (1943-2012) que está siendo construido para el siguiente informe de avance de la consultoría, donde se pretende reconstruir y predecir las series de las estaciones de interés. Bajo este marco, el estudio se organiza de la forma siguiente. Se inicia con un análisis visual, exhaustivo (año a año), de toda la información recolectada por la red del SENAMHI en la región mencionada y descrita en detalle en los títulos siguientes. A través de tal análisis, se identifican los años con inconsistencias y se los excluye del análisis. Luego del análisis visual señalado, se realiza un análisis de consistencia a escala anual de la información pluviométrica disponible, a través de la aplicación de un método derivado del principio de la curva doble acumulada. Mediante aquel método, se agrupan las estaciones en regiones o grupos, para caracterizar la variabilidad climática en la zona. La agrupación de estaciones tiene también el objetivo de definir tendencias de la precipitación (a escala anual), por región o grupo. Luego, una vez definidos los grupos con comportamiento consistente, se procede a realizar un análisis similar para las variables restantes. Finalmente, las tendencias de las series anuales se definen mediante un análisis de regresión lineal simple. Los resultados y conclusiones son producto del procedimiento descrito.

2. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA Y ANÁLISIS DE TENDENCIAS

El análisis de consistencia se realiza en varios pasos. El primero comprende el análisis visual de las tendencias descritas por los registros anuales, debido a que a esta escala es más sencilla la identificación de errores y probables inconsistencias en los datos registrados en las estaciones. El

siguiente paso comprende el análisis visual de las series mensuales (UNESCO, 1982; WMO, 2011). Matemáticamente, la consistencia de las series climáticas pueden analizarse a través de métodos estandarizados, como el de la curva doble acumulada (Chow *et al.*, 1998). Basado en este método, el análisis de series de precipitación en este estudio se realiza, primero a través de análisis visual de las series (*e.g.*., Koteggoda y Rosso, 2007) y luego a través del método del vector regional (ORSTOM, 1972). Como producto de este análisis, las estaciones meteorológicas, o más propiamente la información de las variables climáticas allí registradas, se asociarán en grupos, dentro de los cuales se esperará que el comportamiento o tendencias sean similares o consistente. En el presente estudio, cada asociación se denomina simplemente "grupo ".

El método del vector regional crea un vector de índices anuales de la variable en cuestión, en base a una serie cronológica de datos ficticios correspondientes a la estación ficticia creada (ORSTOM, 1972). En este proceso se toman en cuenta los efectos de la tendencia de las series y los pseudo-ciclos de la zona climática que afectan a cada una de las estaciones, con el objeto de verificar la homogeneidad temporal y espacial de las series (ORSTOM, 1972). La aplicación del método se realiza a través de un rutina programada por ORSTOM (1972). En el proceso, el principal criterio para identificar la pertenencia o no de una estación a un determinado grupo climático se define en base al coeficiente de correlación lineal *r* (*e.g.,* ver Soria, 2004). Se remite al lector a consultar ORSTOM (1972) por detalles de los principios matemáticos.

Los resultados de la aplicación del criterio del vector regional son útiles para el análisis de las tendencias de las series de precipitación, aunque bajo parámetros adimensionales. El análisis de tendencias se complementa con ajustes de regresión lineal simple, por etapas dentro del periodo histórico con información disponible.

3. RESULTADOS

3.1 Análisis de consistencia a escala anual de la precipitación total

Se analizaron los registros de precipitación anual total en 63 estaciones. La razón de considerar tal rango de información, en un área relativamente amplia, en lugar de enfocar el análisis a un área pequeña concentrada en el área inmediata al Parque Nacional Sajama, es la limitada información climática histórica que existe en el área de interés. Esta limitante demanda la necesidad de entender la variabilidad hidro climática en una región más extensa, como herramienta para explicar las tendencias locales. Un análisis similar fue realizado por García (2012), pero desde una perspectiva agroclimática; el presente estudio incluye un número mayor de estaciones, ampliando los alcances del estudio citado.

Los datos a escala diaria proporcionada por el SENAMHI Bolivia fueron procesados a escala anual, mediante revisión, corrección y/o eliminación de datos identificados como sospechosos o inconsistentes a través de un análisis visual de los datos originales. Debido al volumen de información, para dar lugar al proceso descrito los datos se asociaron espacialmente y de manera preliminar en cuatro zonas, a través de un análisis visual que considera elementos de la geografía

local tales como la topografía (*i.e.,* cuencas hidrográficas, en base al criterio de Iriarte, 2005 y a la información topográfica del SRTM DEM, Rodríguez *et al.*, 2005, la elevación de las estaciones y el sentido de viaje de las corrientes que transportan la humedad). El listado de las estaciones consideradas y las variables recopiladas se presentan en la tabla 1; la tabla 2 indica los periodos de la base de datos que se consideran sospechosos; la figura 1 muestra la distribución espacial de las estaciones; finalmente, a continuación se describen las zonas preliminarmente consideradas:

i) Zona 1. Lago Titicaca (cuenca del Lago Titicaca).
ii) Zona 2. Lago Poopó.
iii) Zona 3. Sajama y Coipasa (Cordillera de Pacajes y Carangas, oeste del Lago Poopó).
iv) Zona 4. Alto Desaguadero y Desaguadero central (el área no comprendida por ninguna de las otras tres zonas, al sur de la cuenca del Lago Titicaca, noroeste de la zona 2 y norte de la zona 3).

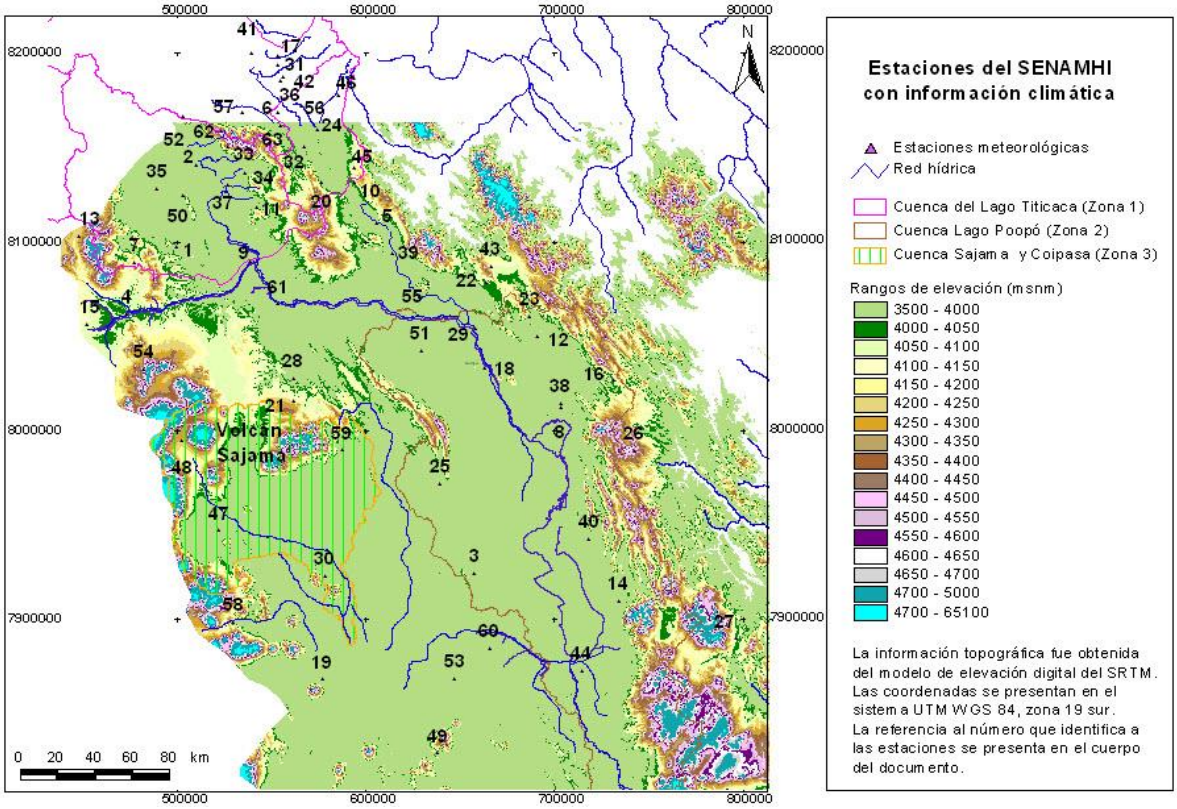


Figura 1 Zonas para la identificación preliminar de estaciones con comportamiento homogéneo. La información topográfica corresponde al SRTM DEM con resolución horizontal de 90m

Tabla 1 Listado de estaciones para el análisis. Las coordenadas están en el sistema WGS 84.

					Información disponible en formato digital						
ID	Estacion	Altitud, msnm	Latitud sur	Longitud oeste	Precipitación	Temperatura media del aire	Humedad relativa media del aire	Velocidad media del viento	Evaporación de tanque	Radiación solar, insolación	Zona
1	Achiri	3880	17º 12' 42"	68º 59' 58"	x	x	x				1, 4
2	Aguallamaya	3803	16º 49' 11"	68º 54' 4"	x						1
3	Andamarca	3762	18º 46' 19"	67º 30' 23"	x	x	x	x			2, 3
4	Avaroa	3953	17º 32' 0"	69º 15' 0"	x						3, 4
5	Ayo Ayo	3888	17º 5' 39"	68º 0' 30"	x	x	x	x			4
6	Batallas	3825	16º 25' 0"	68º 29' 0"	x						1
7	Berenguela	4120	17º 17' 20"	69º 12' 51"	x						1, 4
8	Cabaña_Forestal_Oruro	3720	17º 58' 29"	67º 4' 48"	x	x					2
9	Calacoto	3826	17º 16' 50"	68º 38' 8"	x	x	x	x			1, 3, 4
10	Calamarca	3954	16º 54' 0"	68º 7' 0"	x	x		x			1, 4
11	Caquiaviri	3951	17º 1' 20"	68º 36' 20"	x	x	x				1, 4
12	Caracollo Cadea	3795	17º 38' 11"	67º 12' 1"	x	x	x				2
13	Catacora	4253	17º 9' 31"	69º 29' 11"	x	x	x				1, 4
14	Challapata (Tacagua)	3733	18º 53' 45"	66º 46' 40"	x	x					2
15	Charaña	4057	17º 35' 0"	69º 27' 0"	x	x	x				3, 4
16	Chillca	4025	17º 50' 13"	66º 48' 50"	x	x					2
17	Chirapaca	3870	16º 17' 46"	68º 29' 47"	x	x	x	x	x		1
18	Chuquiña	3735	17º 47' 13"	67º 27' 50"	x	x	x	x			2
19	Coipasa	3680	19º 17' 0"	68º 16' 0"	x	x	x	x			3, 4
20	Collana	3911	16º 54' 1"	68º 16' 54"	x	x	x	x			1, 4
21	Comanche	4055	17º 57' 0"	68º 25' 0"	x	x		x			3, 4
22	Conchamarca	3965	17º 22' 37"	67º 27' 19"	x						2
23	Condoriri	3860	17º 32' 25"	67º 14' 12"	x	x	x				2, 4
24	Coniri	3310	16º 39' 0"	68º 18' 0"	x						1
25	Corque	3758	18º 20' 38"	67º 40' 42"	x	x	x	x			2, 3
26	Cosapa	3906	18º 10' 40"	68º 42' 23"	x	x		x	x		2
27	Cruce Ventilla	3560	19º 4' 0"	66º 11' 0"	x						2
28	Curahuara de Carangas	3906	17º 50' 33"	68º 24' 59"	x	x		x	x		3, 4
29	Eucaliptus	3761	17º 35' 47"	67º 30' 22"	x	x					2, 4
30	Huachacalla	3746	18º 47' 14"	68º 15' 26"	x	x					3
31	Huayrocondo	3875	16º 20' 35"	68º 29' 49"	x	x	x	x	x		1
32	Irpa Chico	3830	16º 44' 0"	68º 22' 0"	x						1, 4
33	Jesús de Machaca	3855	16º 44' 0"	68º 45' 0"	x						1
34	Jihuacuta	3912	16º 51' 29"	68º 39' 44"	x						1
35	Jinchaca	4000	16º 56' 0"	69º 6' 0"	x						1
36	Laja	3874	16º 32' 0"	68º 23' 0"	x						1
37	Nazacara	3820	16º 55' 0"	68º 45' 0"	x						1
38	Oruro Aeropuerto	3702	17º 57' 10"	67º 4' 47"	x	x					2
39	Patacamaya	3793	17º 14' 19"	67º 55' 23"	x	x	x	x	x	x	1
40	Pazña	3695	18º 35' 57"	66º 55' 48"	x	x					2
41	Peñas	3986	16º 17' 0"	68º 38' 0"	x						1
42	Pucarani	4354	16º 23' 46"	68º 28' 29"	x						1
43	Puchuni	4208	17º 18' 0"	67º 26' 0"	x						2, 4
44	Quillacas	3724	19º 13' 48"	66º 57' 35"	x	x					2
45	Quilviri H	4000	16º 50' 0"	68º 7' 0"	x						1, 4
46	Rio Seco	4025	16º 29' 0"	68º 12' 0"	x						1
47	Sacabaya	3845	18º 34' 19"	68º 47' 21"	x						3
48	Sajama	4255	18º 8' 14"	68º 58' 27"	x	x					3, 4
49	Salinas G. De Mendoza	3680	19º 38' 0"	67º 41' 0"	x						3
50	San Andres De Machaca	3913	16º 58' 0"	68º 58' 0"	x						1
51	San Jose Alto	3746	17º 42' 16"	67º 46' 43"	x						2, 3, 4
52	San Juan Huancollo	3829	16º 35' 8"	68º 58' 0"	x	x	x	x			1
53	San Martin	3712	19º 16' 30"	67º 35' 57"	x	x					2, 3
54	Sepulturas	5184	17º 48' 0"	69º 10' 0"	x	x					3, 4
55	Sica Sica	3917	17º 23' 0"	67º 45' 0"	x	x					1, 2, 4
56	Tambillo_LP	3850	16º 34' 0"	68º 30' 0"	x						1
57	Tiawanacu	3863	16º 34' 7"	68º 40' 42"	x	x	x	x	x		1
58	Todo Santos_Or	3805	19º 0' 28"	68º 42' 55"	x	x					3
59	Turco	3842	18º 11' 5"	68º 10' 23"	x	x					2, 3, 4
60	Ucumasi	3764	19º 7' 49"	67º 25' 29"	x						2, 3
61	Ulloma	3856	17º 29' 8"	68º 29' 38"	x						3
62	Viacha	3850	16º 39' 30"	68º 16' 55"	x	x	x	x	x		1
63	Yanamuyo Alto	3940	16º 38' 0"	68º 29' 0"	x						1

Tabla 2 Periodos sospechosos en los registros, a escala anual, por zonas

ID	Estacion	Altitud, msnm	Zona	Periodos sospechosos, serie de precipitación anual
1	Achiri	3880	1, 4	sin periodos sospechosos
2	Aguallamaya	3803	1	sin periodos sospechosos
3	Andamarca	3762	2, 3	1977, 1979, 1980, 1982
4	Avaroa	3953	3, 4	serie corta
5	Ayo Ayo	3888	4	sin errores aparentes
6	Batallas	3825	1	serie muy corta para identificar valores sospechosos
7	Berenguela	4120	1, 4	1976, 1977, 1980, 1981, 1983, 1985
8	Cabaña_Forestal_Oruro	3720	2	serie muy corta para identificar errores
9	Calacoto	3826	1, 3, 4	1996-1997, pero era un ENSO
10	Calamarca	3954	1, 4	1984, 1988-1995, 1997, 1999 (podría tambien ser el periodo previo)
11	Caquiaviri	3951	1, 4	Comportamiento heterogéneo, que no permite identificar errores
12	Caracollo Cadea	3795	2	1974
13	Catacora	4253	1, 4	1998, 2000, 2003
14	Challapata (Tacagua)	3733	2	serie con varias lagunas de datos, que complican la identificación de errores
15	Charaña	4057	3, 4	serie corta
16	Chillca	4025	2	
17	Chirapaca	3870	1	serie corta para identificar valores sospechosos
18	Chuquiña	3735	2	1976-1980
19	Coipasa	3680	3, 4	serie corta
20	Collana	3911	1, 4	1973
21	Comanche	4055	3, 4	por comparación con Curahuara, aparentemente el único periodo correcto es
22	Conchamarca	3965	2	1977-1981
23	Condoriri	3860	2, 4	1964-1966
24	Coniri	3310	1	1973
25	Corque	3758	2, 3	serie corta
26	Cosapa	3906	2	serie corta
27	Cruce Ventilla	3560	2	serie muy corta para identificar errores
28	Curahuara de Carangas	3906	3, 4	1980, serie corta
29	Eucaliptus	3761	2, 4	1995,1996, 1998
30	Huachacalla	3746	3	2000, serie corta
31	Huayrocondo	3875	1	sin errores aparentes
32	Irpa Chico	3830	1, 4	1980-1985, 1994-1996
33	Jesús de Machaca	3855	1	1983; serie muy corta para identificar más errores
34	Jihuacuta	3912	1	1985, 2000, 2009-2012
35	Jinchaca	4000	1	1987-1990
36	Laja	3874	1	1985-1988
37	Nazacara	3820	1	serie corta para identificar tendencias
38	Oruro Aeropuerto	3702	2	sin errores aparentes
39	Patacamaya	3793	1	sin periodos sospechosos
40	Pazña	3695	2	serie muy corta para identificar errores
41	Peñas	3986	1	1965, 1966, 1977a 1984, 2000-2001
42	Pucarani	4354	1	sin periodos sospechosos
43	Puchuni	4208	2, 4	sin errores aparentes
44	Quillacas	3724	2	1979, 1981
45	Quilviri H	4000	1, 4	serie muy corta para identificar valores sospechosos
46	Rio Seco	4025	1	serie muy corta para identificar valores sospechosos
47	Sacabaya	3845	3	1977, 1981, 1982, serie corta
48	Sajama	4255	3, 4	sin errores aparentes
49	Salinas G. De Mendoza	3680	3	1949-1953, 1957-1961, 1963-1967, 1982, 1991
50	San Andres De Machaca	3913	1	sin errores aparentes
51	San Jose Alto	3746	2, 3, 4	sin errores aparentes
52	San Juan Huancollo	3829	1	1984, 1985
53	San Martin	3712	2, 3	sin errores aparentes
54	Sepulturas	5184	3, 4	sin errores aparentes
55	Sica Sica	3917	1, 2, 4	1944-1972
56	Tambillo_LP	3850	1	serie con muchas lagunas; compleja la identificación de valores sospechosos
57	Tiawanacu	3863	1	1973-1975, 1977-1981, 1983-1987
58	Todo Santos_Or	3805	3	serie muy corta
59	Turco	3842	2, 3, 4	serie muy corta para identificar errores
60	Ucumasi	3764	2, 3	sin errores aparentes
61	Ulloma	3856	3	serie muy corta
62	Viacha	3850	1	1973-1982
63	Yanamuyo Alto	3940	1	1979

El análisis matemático de la consistencia de los datos a escala anual mediante el vector regional, toma como referencia los siguientes parámetros: media observada vs media calculada y el coeficiente de regresión lineal *r* de la estación. La aplicación del método del vector regional para el análisis de consistencia de la información sugiere la conformación de los seis grupos descritos a continuación (este criterio reemplaza el de las zonas previamente identificadas). Las tablas 3 a 10 presentan los resultados de la aplicación del vector regional; la figura 2 presenta la configuración de los grupos.

- Grupo 1. Este y sudeste de la cuenca del Lago Titicaca. Estaciones Chirapaca, Collana, Coniri, Huayrocondo, Peñas, Pucarani, Río Seco, San Juan Huancollo, Tambillo (La Paz), Tiahuanacu, Viacha y Yanamuyo Alto.

Notas.

- Las estaciones con menor correlación con el grupo son Río Seco y Tambillo. Río Seco y Tambillo tienen series relativamente cortas y con lagunas de información, lo cual explica la divergencia en su comportamiento respecto al grupo, según los argumentos del vector regional (tabla 3).

- Se excluye a Batallas, porque su serie presenta una tendencia irregular. Pucarani y Huayrocondo se encuentran próximas a Batallas, por tanto excluir a la última no implicaría mayor inconveniente en el análisis.

- Debido a que sus registros son cortos, se excluye del análisis a las siguientes estaciones: Jesús de Machaca, Jinchaca, Irpa chico, Laja, Quilviri.

Tabla 3 Criterio de homogeneidad del vector regional para el grupo 1

ID	estación	Número de años con observaciones	Media observada (mm)	Media calculada (mm)	r
17	Chirapaca	21	540.2	579.3	0.746
20	Collana	39	543	539.7	0.797
24	Coniri	18	540.6	517.7	0.734
31	Huayrocondo	18	553.1	590.8	0.893
41	Peñas	15	631.4	664.1	0.716
42	Pucarani	26	540.2	571.6	0.914
46	Rio Seco	15	542.1	609.2	0.665
52	San Juan Huancollo	27	670.9	706.2	0.754
56	Tambillo_LP	22	527.5	490.8	0.643
57	Tiawanacu	27	465.5	495.2	0.811
62	Viacha	28	498.1	531.4	0.755
63	Yanamuyo Alto	14	573.4	522.5	0.72

- Grupo 2. Sudoeste y sur de la cuenca del Lago Titicaca. Estaciones Achiri, Aguallamaya, Avaroa, Berenguela, Calacoto, Catacora, Charaña, Curahuara de Carangas, Jihuacuta, Nazacara, San Andrés de Machaca, Sepulturas, Turco.

Notas.

- Se excluye a Ulloma debido a que sus registros son cortos.

- En el caso de Jihuacuta, su correlación con el grupo mejora notablemente al eliminar los años sospechosos 1986, 2007, 2008, donde el comportamiento no sigue al del grupo correspondiente.

- La estación con menor correlación con las del grupo es Catacora (tabla 4). La misma situación se repite aún cuando la estación se agrupa únicamente con las estaciones más próximas (tabla 5). La estación se encuentra en la ladera opuesta a las del grupo, lo cual explica el comportamiento.

- Curahuara de Carangas tiene baja correlación con el grupo (tabla 6). Este es el grupo con el cual mejor correlación se observó.

- La estación Calacoto tiene correlación débil. Este es el grupo con el cual mejor correlación se observó.

- Se introdujo a Turco y se observó que este es el grupo con el cual mejor correlación se observó.

Tabla 4 Criterio de homogeneidad del vector regional para el grupo 2

ID	estación	Número de años con observaciones	Media observada (mm)	Media calculada (mm)	r
1	Achiri	34	480.7	497.7	0.946
2	Aguallamaya	9	473.6	494.5	0.851
4	Avaroa	13	333.6	304.4	0.913
7	Berenguela	26	249.5	260.4	0.888
9	Calacoto	41	427.4	437.2	0.63
15	Charaña	32	310.8	304.8	0.838
28	Curahuara de Carangas	6	508.8	589.4	0.594
34	Jihuacuta	16	504.6	606.5	0.724
37	Nazacara	11	460.8	499.9	0.887
50	San Andrés de Machaca	24	560.2	609.8	0.838
54	Sepulturas	16	334.7	384.8	0.813

Tabla 5 Homogeneidad de la serie de precipitación para la estación Catacora, de acuerdo al criterio del vector regional

ID	estación	Número de años con observaciones	Media observada (mm)	Media calculada (mm)	r
7	Berenguela	15	242.7	232.7	0.885
13	Catacora	9	526.9	618.6	0.435
15	Charaña	15	262.5	248.2	0.721
54	Sepulturas	14	351.3	345.7	0.899

Tabla 6 Criterio de homogeneidad del vector regional para el grupo 2 (se excluye la estación Catacora)

ID	estación	Número de años con observaciones	Media observada (mm)	Media calculada (mm)	r
1	Achiri	34	480.7	503.6	0.931
2	Aguallamaya	9	473.6	480.8	0.777
4	Avaroa	13	333.6	302.9	0.922
7	Berenguela	26	249.5	260.3	0.873
9	Calacoto	41	427.4	443.1	0.647
15	Charaña	32	310.8	306	0.834
28	Curahuara de Carangas	6	508.8	599.7	0.509
34	Jihuacuta	16	504.6	612.4	0.726
37	Nazacara	11	460.8	501.4	0.881
50	San Andrés de Machaca	24	560.2	614.7	0.835
54	Sepulturas	16	334.7	401.7	0.815
59	Turco	13	448.2	482.9	0.521

- Grupo 3. Al norte y noreste del Parque Nacional Sajama; al sur de las cuencas del Lago Titicaca y del río Mauri; al noroeste de la cuenca del Lago Poopó. Estaciones Ayo Ayo, Calacoto, Collana, Comanche, Conchamarca, Condoriri, Eucaliptus, Patacamaya, Puchuni.

Notas.

- Comanche. Se omitieron los años 1972 y 1976.

- La serie Curahuara de Carangas tiene pocos años con información. Se omitieron los años 1979 y 1980. La correlación es muy baja, aun tomando en cuenta su proximidad geográfica. Se omitirá del análisis y se mantiene en el grupo 2.

- Calamarca. Tiene un comportamiento complejo en el periodo 1961-1971. Debido a que no se cuenta con información suficiente en este periodo, se decidió omitir los datos. Aun bajo aquellas consideraciones, la correlación es muy baja, aun tomando en cuenta su proximidad geográfica. Se omitirá del análisis.

- Luego de excluir del análisis a las estaciones Calamarca, Curahuara de Carangas y Sica Sica, las estaciones con la correlación más débil son Calacoto, Conchamarca, Puchuni y San José Alto. En Puchuni se omitieron los años 1995 a 1997, incrementando su nivel de correlación con las estaciones del grupo. En Conchamarca se sugiere corregir (omitir) el periodo 2008 a 2012 y el año 1994. En San José Alto se omitió el periodo 2002-2007; la correlación más fuerte se observó dentro del grupo 4. En Calacoto la serie es extensa y no se realizaron correcciones. La tabla 7 presenta los resultados finales del grupo.

Tabla 7 Criterio de homogeneidad del vector regional para el grupo 3

ID	estación	Número de años con observaciones	Media observada (mm)	Media calculada (mm)	r
5	Ayo Ayo	57	397.9	397.5	0.926
9	Calacoto	54	422.2	430.5	0.642
20	Collana	39	543	535.7	0.813
21	Comanche	20	555.6	552.8	0.847
22	Conchamarca	23	438.8	454.2	0.743
23	Condoriri	15	391.6	391.2	0.813
29	Eucaliptus	9	420.8	386.6	0.931
39	Patacamaya	56	396	397	0.925
43	Puchuni	23	427.8	401.3	0.721

- Grupo 4. Cuenca del Lago Poopó. Estaciones Cabaña Forestal, Caracollo, Chillca, Chuquiña, Coipasa, Conchamarca, Condoriri, Corque, Cosapa, Eucaliptus, Oruro, Puchuni, Quillacas, Salinas de G. Mendoza, San José Alto, San Martín, Sica Sica, Ucumasi.

Notas.

- Se excluye Andamarca para el análisis debido a que su correlación es débil. Se la mantiene en el grupo por ubicación geográfica.

- Chillca. Tiene correlación débil y comportamiento con tendencia opuesta a estaciones próximas geográficamente como Oruro, Caracollo, Cabaña Forestal. Se excluye del análisis pero se mantiene en el grupo por su ubicación geográfica.

- Chuquiña. Con varias lagunas de información, que impiden la identificación de errores.

- Curahuara de Carangas. Correlación débil. Se excluyen del grupo.

- San José Alto tiene mejor correlación en este grupo, en comparación a lo observado dentro del grupo 3.

- En Sica Sica se omiten los años 1982, 1983, 1988, 1991. La serie presenta correlación débil dentro del grupo 3, lo cual es difícil de explicar dada su proximidad geográfica; dentro del grupo 4 presenta una mejor correlación. Esta es una estación donde se habían observado inconsistencias enormes y altamente relevantes durante el tratamiento preliminar de sus datos, dado que se omitió por completo el periodo 1944-1972, información con alto valor histórico, pero erróneamente registrada.

- Turco. Se excluye del grupo.

- Ucumasi. Se excluye el año 2009-2010.

- Caracollo, Corque, Quillacas. Sin correcciones.

- La configuración final del grupo se presenta en la tabla 8.

Tabla 8 Criterio de homogeneidad del vector regional para el grupo 4

ID	estación	Número de años con observaciones	Media observada (mm)	Media calculada (mm)	r
8	Cabaña Forestal	18	380.3	379.2	0.745
12	Caracollo Cadea	11	393.1	411	0.842
18	Chuquiña	18	367.3	373.5	0.572
19	Coipasa	10	206.3	178.3	0.717
22	Conchamarca	23	438.8	425.4	0.689
23	Condoriri	15	391.6	359.2	0.87
25	Corque	11	333.6	386.8	0.826
26	Cosapa	13	378.5	350.6	0.783
29	Eucaliptus	9	420.8	415.6	0.847
38	Oruro Aeropuerto	46	413.2	423	0.791
43	Puchuni	23	427.8	401.1	0.734
44	Quillacas	18	299.3	291.2	0.859
49	Salinas G. de Mendoza	18	315.4	321.4	0.727
51	San José Alto	27	345.6	342.3	0.844
53	San Martín	23	266.2	278.1	0.815
55	Sica Sica	23	417.8	397.4	0.65
60	Ucumasi	14	383.1	348.4	0.839

- Grupo 5. Oeste y sur de la cuenca del Lago Poopó. Estaciones Challapata, Coipasa, Corque, Cosapa, Pazña, Quillacas, Sacabaya, Salinas de G. Mendoza, San Martín, Todo Santos (Oruro), Ucumasi.

Notas.

- La agrupación de estaciones está parcialmente contenida en el grupo 4. La diferencia es que el grupo 5 contiene a Pazña, Sacabaya y Todo Santos.

- Se excluye a Andamarca. Su correlación es muy débil.

- En Challapata se omiten los años 1965 y 1966; la correlación más fuerte se observa en el grupo 5, por lo que se decidió excluirla del grupo 4.

- Pazña. Se omite el año 1953.

- Debido a que su correlación es débil, se excluyen del grupo a las estaciones Andamarca y Turco.

- La configuración final del grupo se presenta en la tabla 9.

Tabla 9 Criterio de homogeneidad del vector regional para el grupo 5

ID	estación	Número de años con observaciones	Media observada (mm)	Media calculada (mm)	r
14	Challapata (Tacagua)	19	351.8	359	0.867
19	Coipasa	9	187.6	176.6	0.794
25	Corque	11	333.6	385.6	0.899
26	Cosapa	13	378.5	377.6	0.858
40	Pazña	10	388.5	366.1	0.706
44	Quillacas	15	314.4	306.4	0.855
47	Sacabaya	12	234.4	263.5	0.766
49	Salinas G. de Mendoza	12	331.8	306.1	0.748
53	San Martín	20	261.4	297.6	0.874
58	Todo Santos Oruro	20	255.1	250	0.877
60	Ucumasi	12	390.6	391.6	0.786

- Grupo 6. Sajama. Estaciones Coipasa, Comanche, Corque, Cosapa, Sacabaya, Sajama, San Martín, Todo Santos (Oruro), Ucumasi (tabla 10).

Notas.

- La agrupación de estaciones está parcialmente contenida en los grupos 4 y 5. La diferencia es que el grupo 6 contiene a Sajama.

- La estación Huachacalla no pertenece a ningún grupo.

Tabla 10 Criterio de homogeneidad del vector regional para el grupo 6

ID	estación	Número de años con observaciones	Media observada (mm)	Media calculada (mm)	r
19	Coipasa	9	187.6	176.5	0.867
21	Comanche	9	508.1	477.1	0.803
25	Corque	10	339.2	407.2	0.954
26	Cosapa	11	349.1	336.8	0.849
47	Sacabaya	10	176.2	161.5	0.848
48	Sajama	12	315.1	283.3	0.809
53	San Martín	20	261.4	278.1	0.858
58	Todo Santos Oruro	18	235.3	221.1	0.876
60	Ucumasi	12	390.6	349.8	0.79

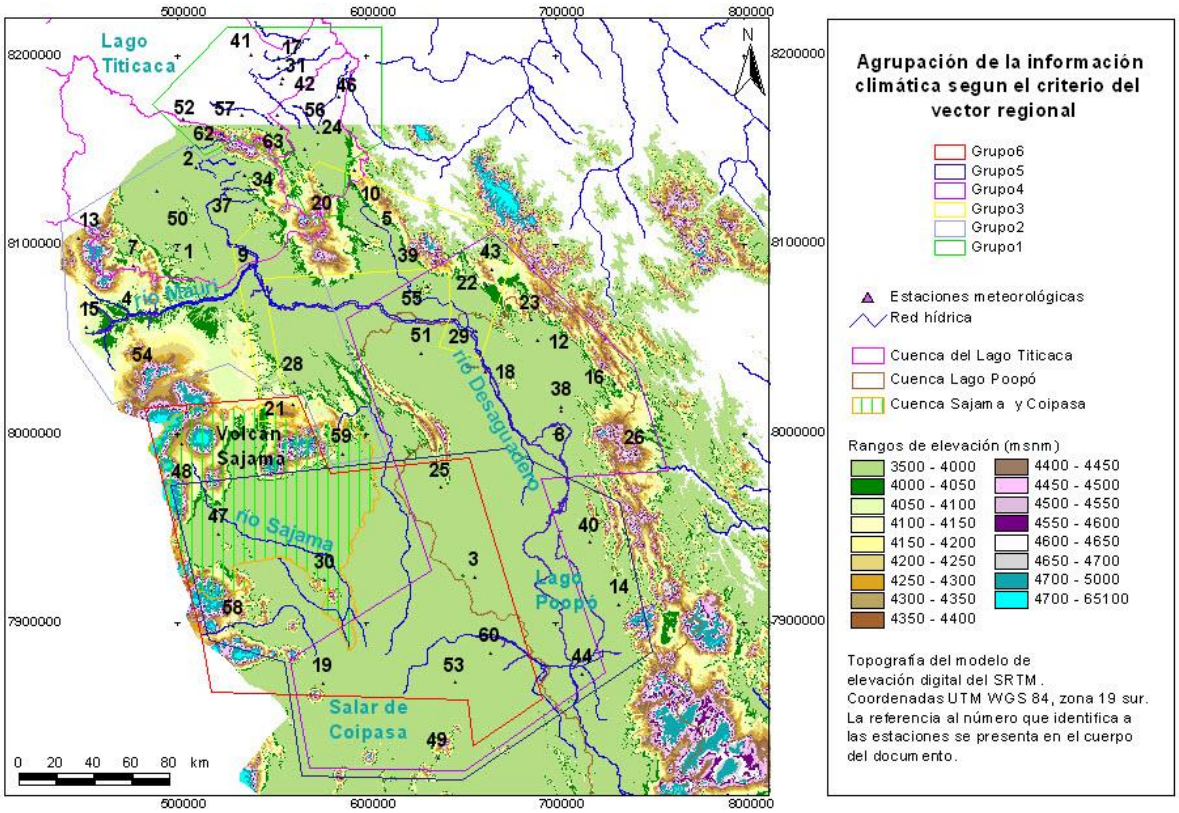


Figura 2 Configuración final de los grupos, de acuerdo al criterio del vector regional

3.2 Series anuales y tendencias de las series de precipitación

La aplicación del criterio del vector regional resulta en vectores que representan de manera individual y general el comportamiento de los grupos conformados. Aparte de las diferencias en magnitud entre los grupos, las tendencias de cada uno describe un comportamiento similar (ver figura 3). Las estaciones Ayo Ayo y Calacoto tienen los registros más extensos (57 y 54 años, respectivamente), proporcionando información acerca de la década del 50 donde el incremento de la precipitación fue una característica. En el periodo que transcurre de 1970 al 2010, la precipitación tiene un comportamiento variado. La región de los grupos 3 y 4 (al norte y noreste del Sajama, Lago Poopó, respectivamente), tiene en la década del 70 un comportamiento mixto, donde la primera parte de la década registra precipitación con tendencia ascendente. La segunda parte de la década del 70 presenta una tendencia descendente, en concordancia con el comportamiento definido por los registros de precipitación en las regiones de los grupos 1, 2, 5 y 6 (Lago Titicaca, sudoeste y sur del Lago Titicaca, oeste y sur del Lago Poopó, Sajama, respectivamente). A partir de allí y hasta finales de la década del 80 la tendencia general tiene sentido descendente, en toda la región donde se colectó información climática. La década del 90 se caracteriza por una tendencia con un leve ascenso en la precipitación, mientras que la década del 2000 presenta tendencia nula, sin incremento o disminución de la precipitación.

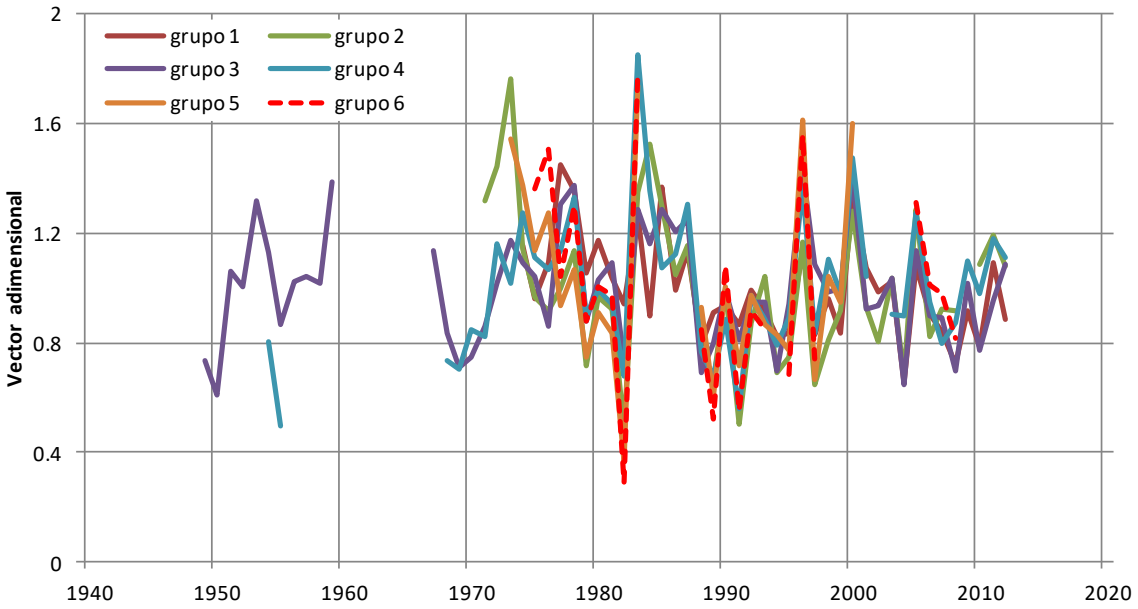


Figura 3 Tendencias de las series anuales, por grupos, de acuerdo al criterio del vector regional. El grupo 6, en línea punteada, es el que contiene a la estación Sajama. El grupo 1 representa el comportamiento de la parte sudeste de la cuenca del Lago Titicaca; el grupo 2 está al sudoeste y al sur de la cuenca del Lago Titicaca; el grupo 3 se encuentra al norte y al noreste del Parque Nacional Sajama; el grupo 4 reúne las estaciones de la cuenca del Lago Poopó; el grupo 5 representa el comportamiento al oeste de la cuenca del Lago Poopó y el sur de la misma cuenca

Para identificar las magnitudes de las tendencias descritas por los vectores regionales del grupo se consideraron las series de las estaciones con registros más confiables. Al respecto, una estación se considera confiable a través de un razonamiento empírico: cuando sus registros son extensos y cuando las tendencias de la estación siguen el comportamiento general de las estaciones que componen el grupo respectivo.

En el grupo 1 (figura 4), la serie Collana tiene un promedio histórico anual de precipitación de 543 mm (periodo 1974-2012). Su comportamiento presenta una tendencia descendente en la década del 70 y del 80, a una tasa aproximada de 6.2 mm por año, seguido por un incremento a razón de 9.7 mm por año en la década del 90. La tendencia descendente a razón de 38 mm por año en el periodo 2000-2008 y el incremento en el periodo 2009-2012 a una tasa de 12.8 mm por año difieren con la tendencia general definida por el vector regional.

El grupo 2 (figura 4) representado por la serie Calacoto, con promedio histórico de 424 mm (periodo 1974-2012), presenta un decremento de 2.2 mm por año en el periodo 1970-1980, seguido por un incremento de 6.5 mm por año en la década del 90; ambas tasas son menores a las observadas en la zona del grupo 1. El incremento de 3.8 mm por año en el periodo 2000-2012 está definido por la tendencia descrita por el vector regional.

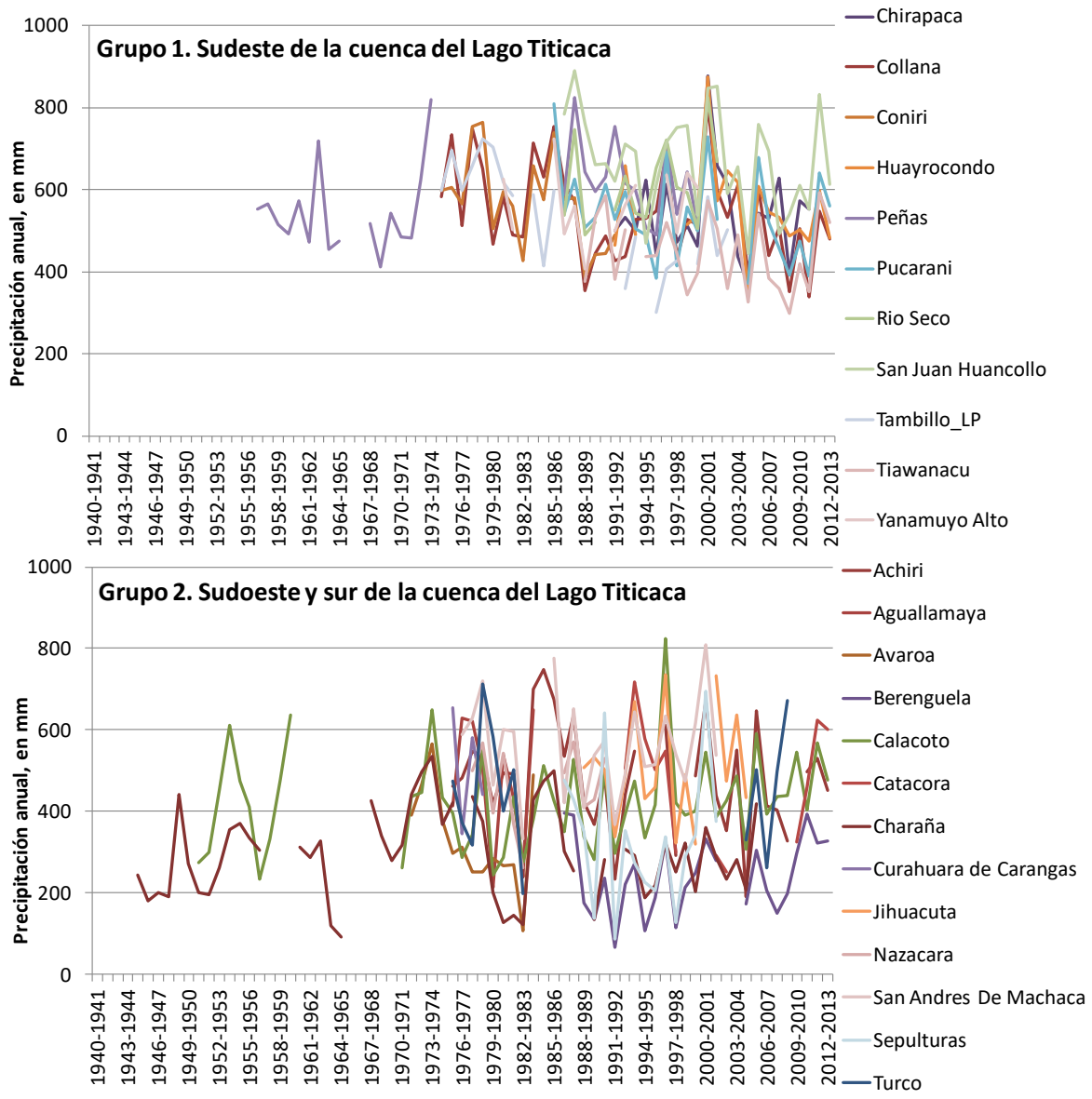
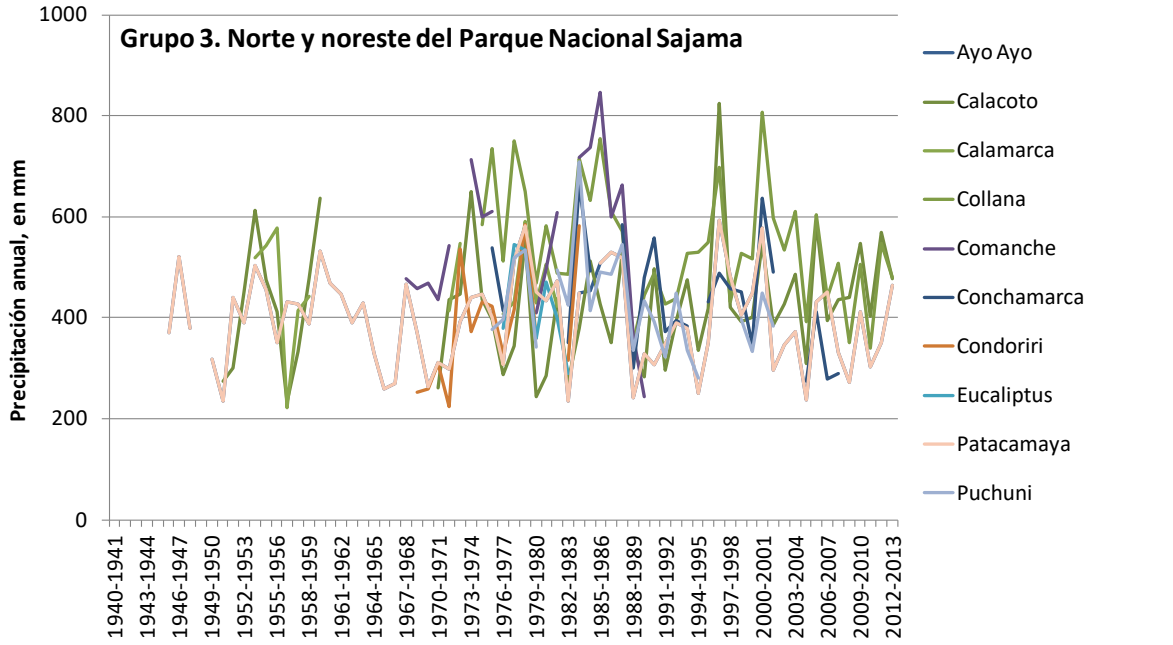


Figura 4 Series anuales de precipitación, en los grupos 1 y 2

El grupo 3 es menos húmedo que la región del Lago Titicaca (grupos 1 y 2), al registrar una media histórica de 400 mm anuales de precipitación (periodo 1974-2012, estación Patacamaya). Tiene también una tendencia que varía en magnitudes menores a las observadas en el grupo 1 (figura 5). Patacamaya presenta un registro con una tendencia general que se divide en tres etapas: la primera desde el año 1945 al año 1962 donde la precipitación tiene tendencia nula, que decrece a mediados de la década del 60 a través de un quiebre. A partir de allí (1965) y hasta el año 2000, la serie presenta periodos cortos con incrementos y descensos que en general describen una

tendencia nula, con leve incremento a una tasa de 2.1 mm por año. A partir del 2001 la tendencia es ascendente, a una tasa de 5.8 mm por año (periodo 2001-2012).

El grupo 4 (figura 6) representado por la serie Oruro-Aeropuerto (lluvia promedio de 432 mm por año, periodo 1974-2012), presenta información histórica desde 1943. La información recopilada indica un comportamiento de la precipitación con tendencia descendente a una tasa de 7.3 mm por año durante el periodo 1943-1966, una tendencia ascendente desde 1967 hasta 1988 a una tasa de 8.5 mm por año, seguido por un corto descenso hasta el año 1991 y finalmente un ascenso constante en el periodo 1992-2012 a razón de 8.1 mm por año.



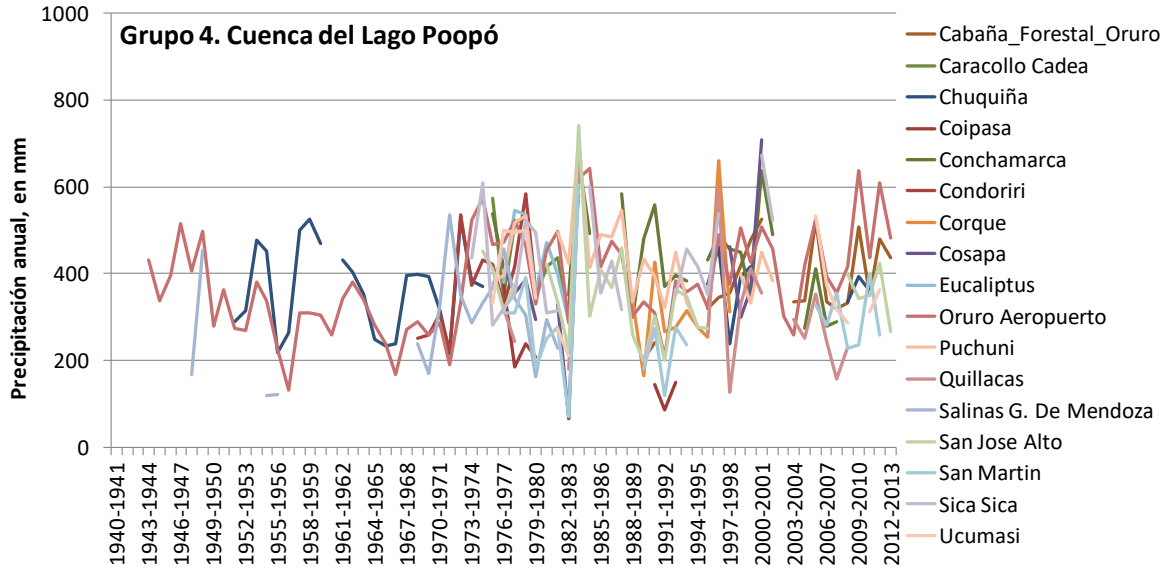


Figura 5 Series anuales de precipitación, en los grupos 3 y 4

La serie más extensa en el grupo 5 (figura 6) es la de Challapata (Tacagua), con registros desde 1943 que muestran una zona menos húmeda que las zonas de los grupos 1 a 4, con precipitación anual promedio de 355 mm (periodo 1974-2012). Los registros en esta zona presentan más lagunas que los de los grupos mencionados, al encontrarse en un área más alejada de las capitales de Departamento. La consecuencia de la ausencia de información es que los datos disponibles no permiten definir tendencias claras; por esta razón, se asume que las tendencias definidas por el vector regional representan el comportamiento del grupo. De esta manera, al superponer el vector regional adimensional del grupo 5 con la serie anual de precipitación medida en Challapata, se observa que la tendencia descendente del vector en el periodo 1973-1982 tiene una tasa de 21 mm por año. La tendencia ascendente descrita por el vector en el periodo 1984-1999 no logró ser identificada en Challapata, presumiblemente como consecuencia de las lagunas en la serie.

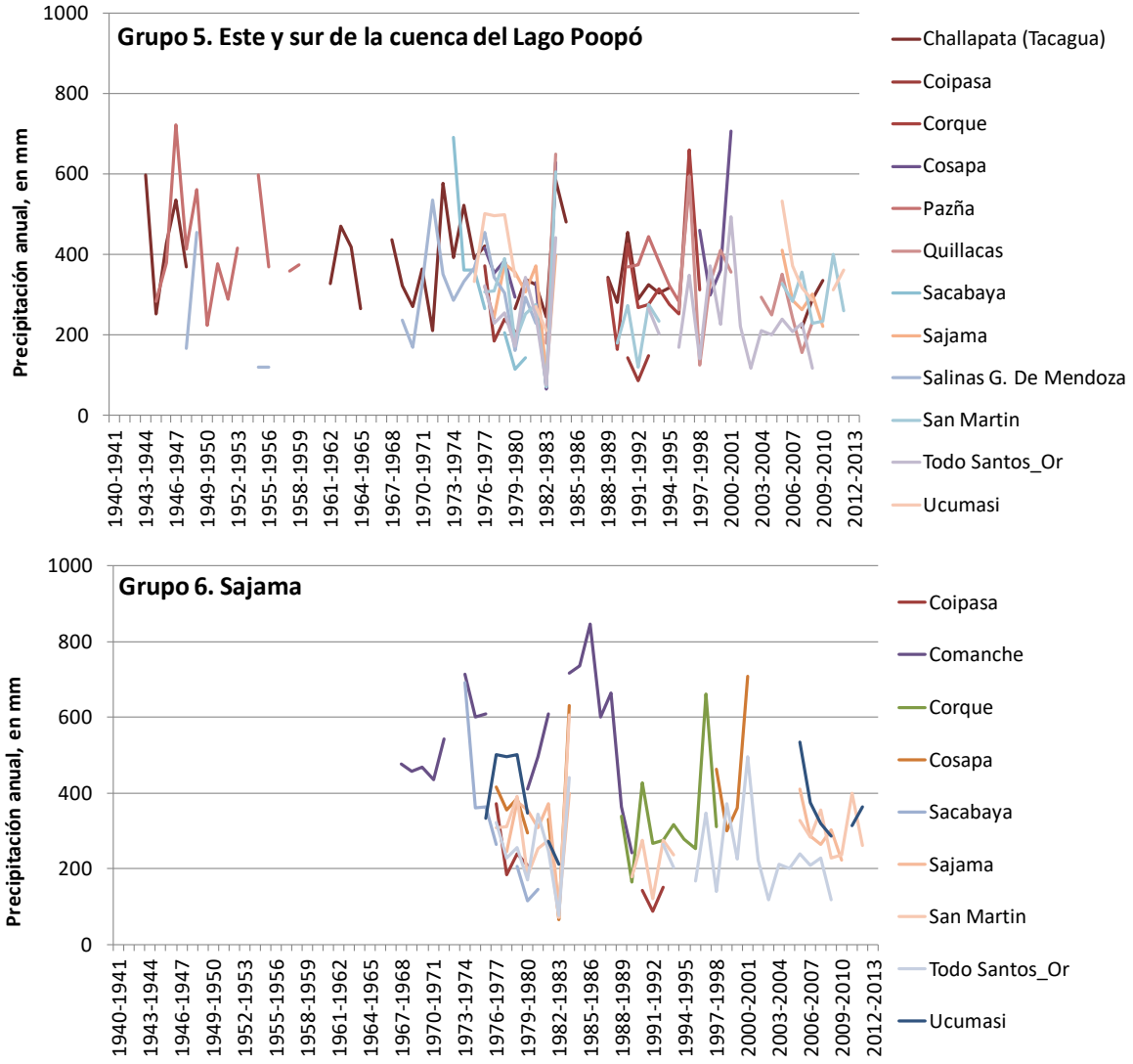


Figura 6 Series anuales de precipitación, en los grupos 5 y 6

La región del Sajama (grupo 6, figura 6) es poco favorecida respecto a la disponibilidad de información, en situación similar a la del grupo 5 y también es la que menos favorecida respecto a la disponibilidad de lluvia (266 mm por año, promedio del periodo 1974-2012). El vector regional del grupo sugiere un comportamiento con una tendencia descendente en el periodo 1975-1982 y una tendencia al ascenso en el periodo 1988-1997. La serie San Martin presenta tendencias similares, con una disminución de la precipitación en el periodo 1976-1982 (-4.5 mm por año). El incremento en el periodo 1979-1983 (12.4 mm por año) es también registrado por el vector del grupo 6, pero la información del grupo es limitada para identificar la tendencia descendente de San Martin en el periodo 1993-1999 (-14.2 mm por año).

3.3 Consistencia y tendencias a escala anual de la temperatura media del aire, humedad relativa media del aire, velocidad media del viento y evaporación de tanque

En el análisis de la calidad de las series de temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad del viento y evaporación de tanque se mantienen los grupos definidos bajo el criterio del vector regional. Este procedimiento se realizó a través del análisis visual de sus series, a diferencia del análisis de las series de precipitación donde se aplicó un criterio derivado de las curvas dobles acumuladas. La razón de considerar este criterio es el siguiente. En el caso de las series de temperatura del aire y humedad relativa del aire, la variabilidad es menos dispersa, por tanto el análisis de regresión lineal no conlleva mayores inconvenientes. En el caso de las series de velocidad media del viento ocurre una dispersión mucho mayor a la registrada en la precipitación, por el criterio del vector regional no sería aplicable. Las series de evaporación de tanque tienen amplias lagunas de información por lo que un análisis visual es suficiente para la identificación de inconsistencias y una simple regresión lineal es suficiente para identificar tendencias.

3.3.1 Temperatura media del aire. Consistencia y tendencias

- Grupo 1. Oeste y sur de la cuenca del Lago Poopó.

Notas.

- San Juan Huancollo. Se omiten los años 1984-1987.

- Grupo 2. Sudoeste y sur de la cuenca del Lago Titicaca.

Notas.

- Achiri. Se omiten los años 2010-2012.

- Charaña. 1967, 1968, 1979, 1980 son años con errores.

- Curahuara de Carangas. El rango de temperaturas es notoriamente amplio. Varía de 19.3 a 24.2ºC, con máximas que alcanzaron los 31.5ºC, correspondiente a una mínima de 5.5 ºC en el mes de febrero de 1978. Aparentemente existe un error en los registros. Se sugiere omitirlos del análisis.

- Grupo 3. Al norte y noreste del Parque Nacional Sajama.

Notas.

- Ayo Ayo y Patacamaya. Los datos hasta antes del año 1968 aparentan estar incorrectos.

- Grupo 4. Cuenca del Lago Poopó..

Notas.

- Con excepción de Oruro, las series de las estaciones del grupo son cortas y con lagunas de información que no permiten la identificación de probables errores.

- Grupo 5. Oeste y sur de la cuenca del Lago Poopó.

Notas.

- Ninguna estación tiene periodos largos de registro, lo cual impide un análisis de tendencias.

- Grupo 6. Sajama.

Notas.

- La estación Comanche sugiere que en el periodo 1967-1990 la temperatura media del aire tiende a disminuir.

Tendencias de la serie anual de temperatura media del aire

Las tendencias en las series de temperatura difieren notablemente de las series de precipitación anual en todos los grupos identificados. La tendencia es en general con una dirección constante. Divergencia a este comportamiento general se encuentra en las series de las estaciones Patacamaya y Calacoto, donde las series tienen comportamiento con un tramo descenso y otro de ascenso, no identificado en otras estaciones, por lo cual se califica este comportamiento como sospechoso. Errores en los instrumentos, cambio de observador y otros errores sistemáticos podrían ser la causa del problema, tal como sugiere personal del SENAMHI (comunicación personal, 2013); por esta razón, se procuró no incluir los datos de ambas estaciones en el análisis.

El grupo 1 (figura 7) presenta temperaturas media del aire que varían de 9.2ºC (estación Collana) a 7.6ºC (estación Huayrocondo), en medias anuales para el periodo 1974-2012. En el grupo, la estación con registros más extensos es Collana. La serie presenta una tendencia sostenida al incremento de la variable a razón de 0.012ºC por año ó 0.12 ºC por década, sin la amplia varianza registrada en variables como la precipitación anual. El grupo 2 tiene temperaturas más bajas (figura 7), con una promedio de la media anual que varía de 6.8ºC (estación Charaña) a 4.4ºC (estación Sepulturas), pero un incremento en la pendiente positiva de 0.033ºC por año que define su tendencia al incremento constante de la temperatura media del aire.

En el grupo 3 (figura 8) la temperatura varía en el rango 9.2ºC (estación Collana) a 7.5ºC (estación Ayo Ayo). Los registros de la serie Ayo Ayo, la de registros más extensos junto a Collana, sugieren una tendencia al incremento a una tasa de 0.016ºC por año, superior a la del grupo 1 e inferior a la

del grupo 3. La serie Oruro, en el grupo 4 (figura 9) presenta la mayor tasa anual de incremento de la temperatura media del aire en comparación a los tres grupos mencionados, con una pendiente positiva de 0.042ºC por año. La temperatura en el grupo 4 varía en una rango promedio de 6.5ºC a 10.1ºC, similar a lo que ocurre en los grupos 1 y 3, con registros más templados que los del grupo 2.

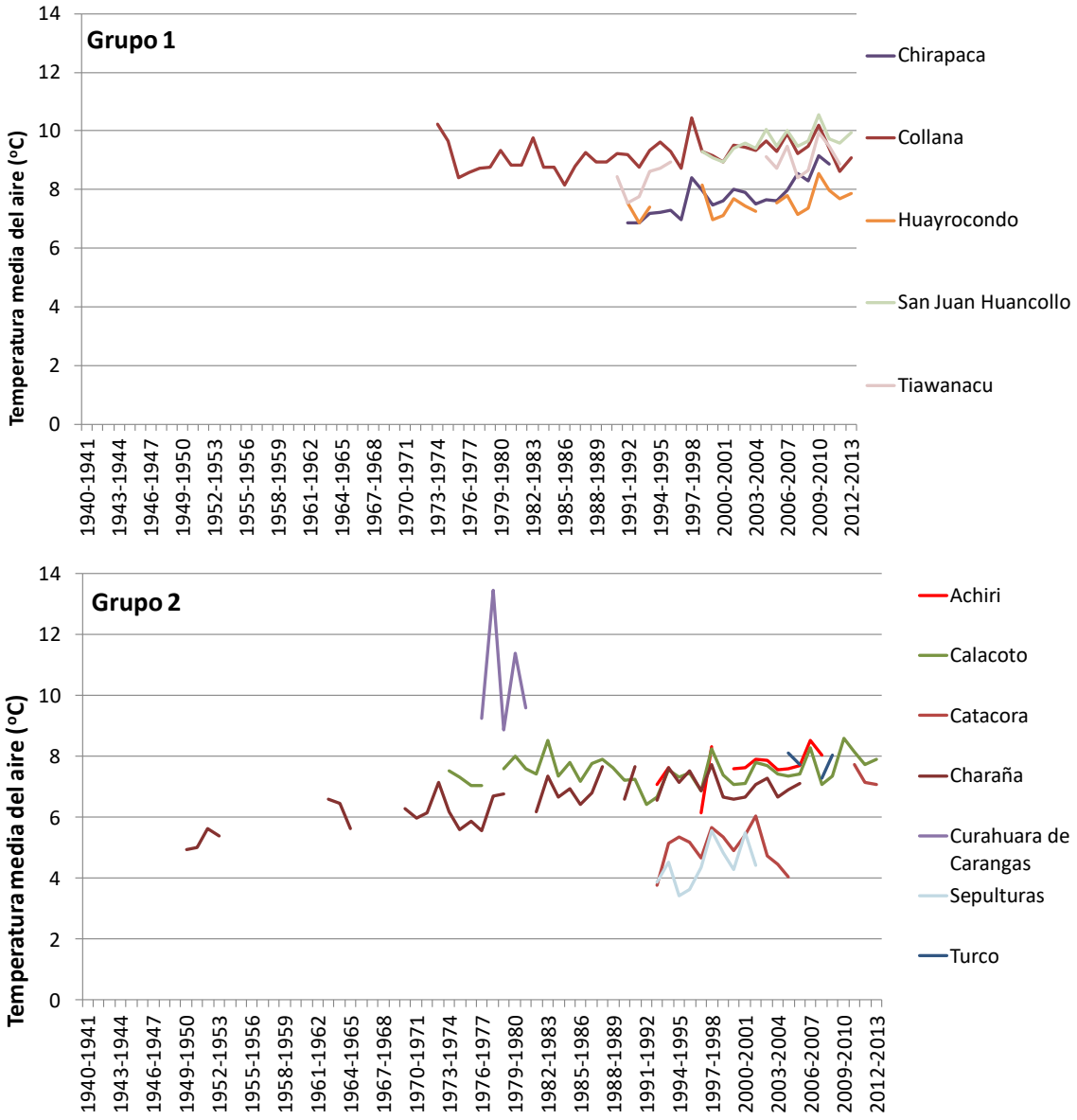


Figura 7 Series anuales de temperatura media del aire, en los grupos 1 y 2

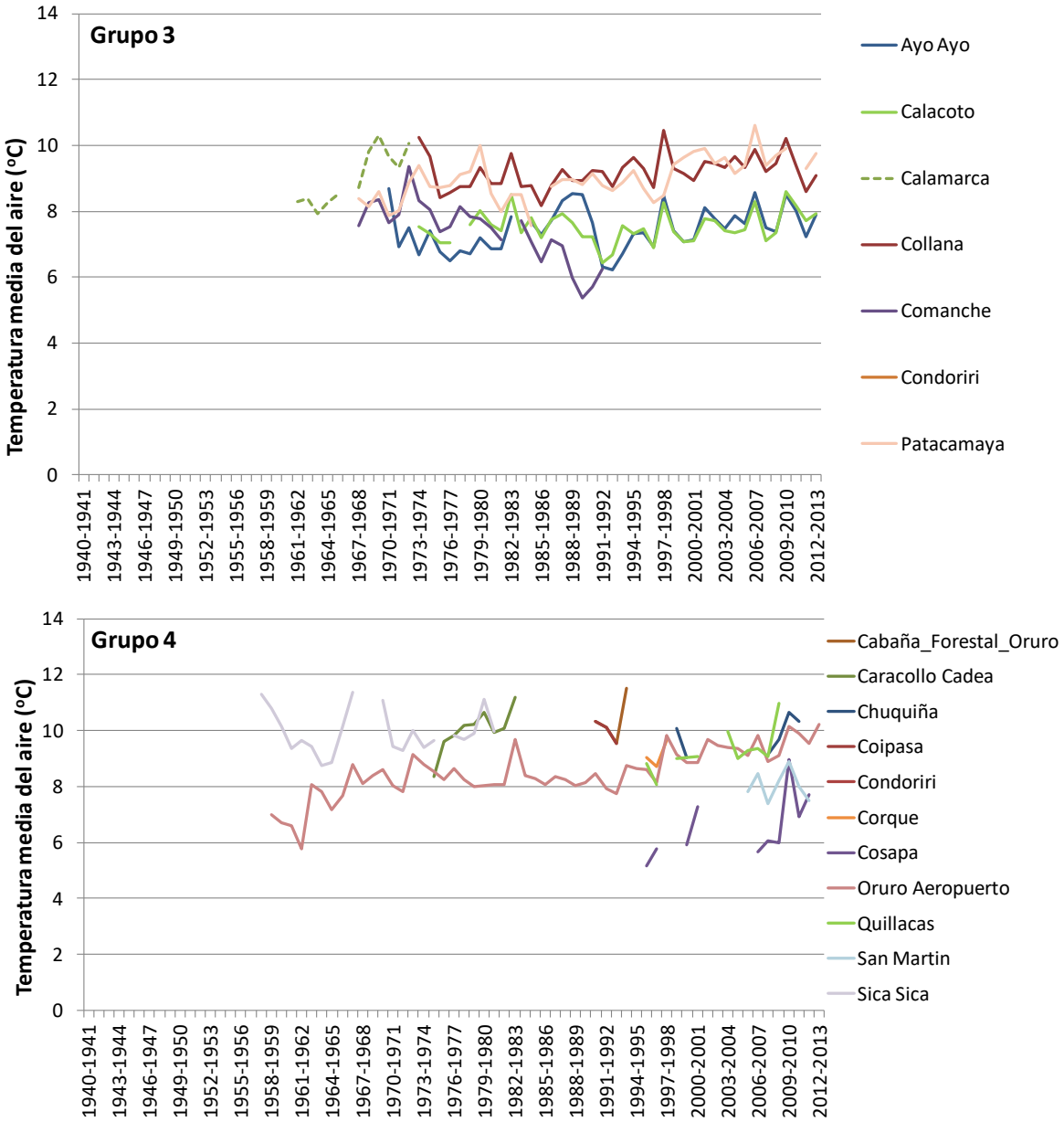


Figura 8 Series anuales de temperatura media del aire, en los grupos 3 y 4

Los grupos 5 y 6 están en regiones frías (los registros más bajos se presentan en Sajama: 4.9°C, periodo 1977-1980), donde los registros presentan lagunas de información no permiten definir las tendencias en las series de temperatura media del aire. En el grupo 5 (figura 9), las cortas series de datos disponibles impiden definir si la tendencia negativa de Challapata o las tendencias positivas de Cosapa y Pazña son representativas del comportamiento del grupo. Tal conclusión aplica también a las series del grupo 6 (figura 9), donde las cortas series de los datos son un obstáculo para definir si la tendencia negativa en la serie Comanche (0.10°C, periodo 1967-1991) o la

tendencia positiva de la serie Cosapa (0.11ºC, periodo 1967-1991) son representativas de la región correspondiente.

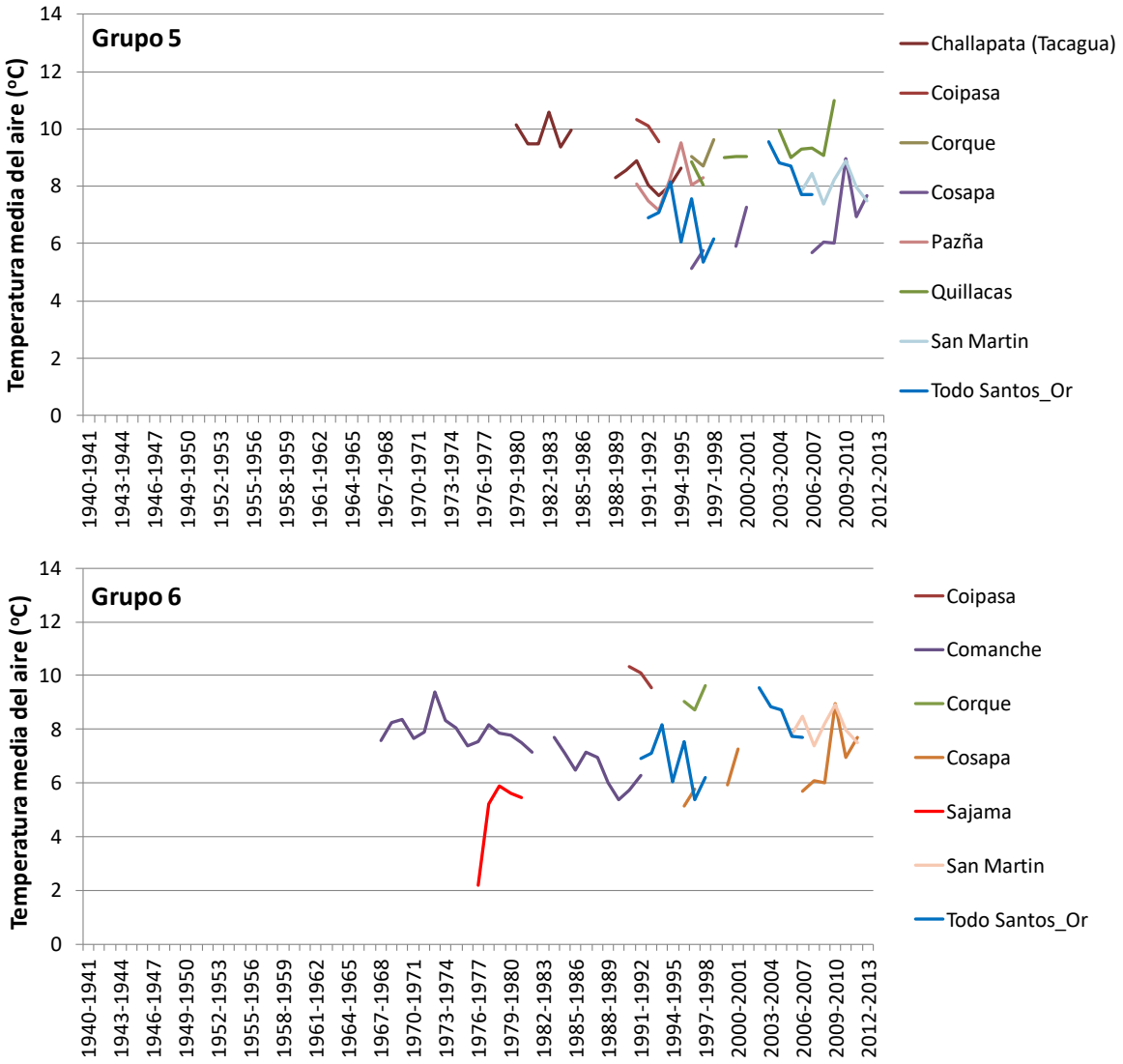


Figura 9 Series anuales de temperatura media del aire, en los grupos 5 y 6

3.3.2 Humedad relativa media del aire. Consistencia y tendencias

- Grupo 1. Oeste y sur de la cuenca del Lago Poopó.

Notas.

- San Juan Huancollo. Se omiten los años 1984-1987.

- Grupo 2. Sudoeste y sur de la cuenca del Lago Titicaca.

Notas.

- Achiri. Se omiten los años 2010-2012.

- Charaña. 1967, 1968, 1979, 1980 son años con errores.

- Curahuara de Carangas. El rango de temperaturas es notoriamente amplio. Varía de 19.3 a 24.2ºC, con máximas que alcanzaron los 31.5ºC, correspondiente a una mínima de 5.5 ºC en el mes de febrero de 1978. Aparentemente existe un error en los registros. Se sugiere omitirlos del análisis.

- Grupo 3. Al norte y noreste del Parque Nacional Sajama.

Notas.

- Ayo Ayo y Patacamaya. Los datos hasta antes del año 1968 aparentan estar incorrectos.

- Grupo 4. Cuenca del Lago Poopó..

Notas.

- Con excepción de Oruro, las series de las estaciones del grupo son cortas y con lagunas de información que no permiten la identificación de probables errores.

- Grupo 5. Oeste y sur de la cuenca del Lago Poopó.

Notas.

- Ninguna estación tiene periodos largos de registro, lo cual impide un análisis de tendencias.

- Grupo 6. Sajama.

Notas.

- La estación Comanche sugiere que en el periodo 1967-1990 la temperatura media del aire tiende a disminuir.

Tendencias de la serie anual de humedad relativa del aire

En general, los registros indican que a escala anual, la humedad relativa media del aire tiene tendencias positivas a tasas que varían entre 0.02% por año (estación Ayo Ayo, grupo 3, figura 11), 0.05% por año (estación Tiahuanacu, grupo 1, figura 10), 0.17% por año (estación Patacamaya, grupo 4, figura 11) y 0.27% por año (estación Calacoto, grupo 2, figura 10). Se descartan los registros con tendencias sospechosas de Collana (figura 11), por lo que no es posible definir tendencias para el grupo 5. No es posible definir tendencias para el grupo 6, serie Sajamam debido a que la serie es corta.

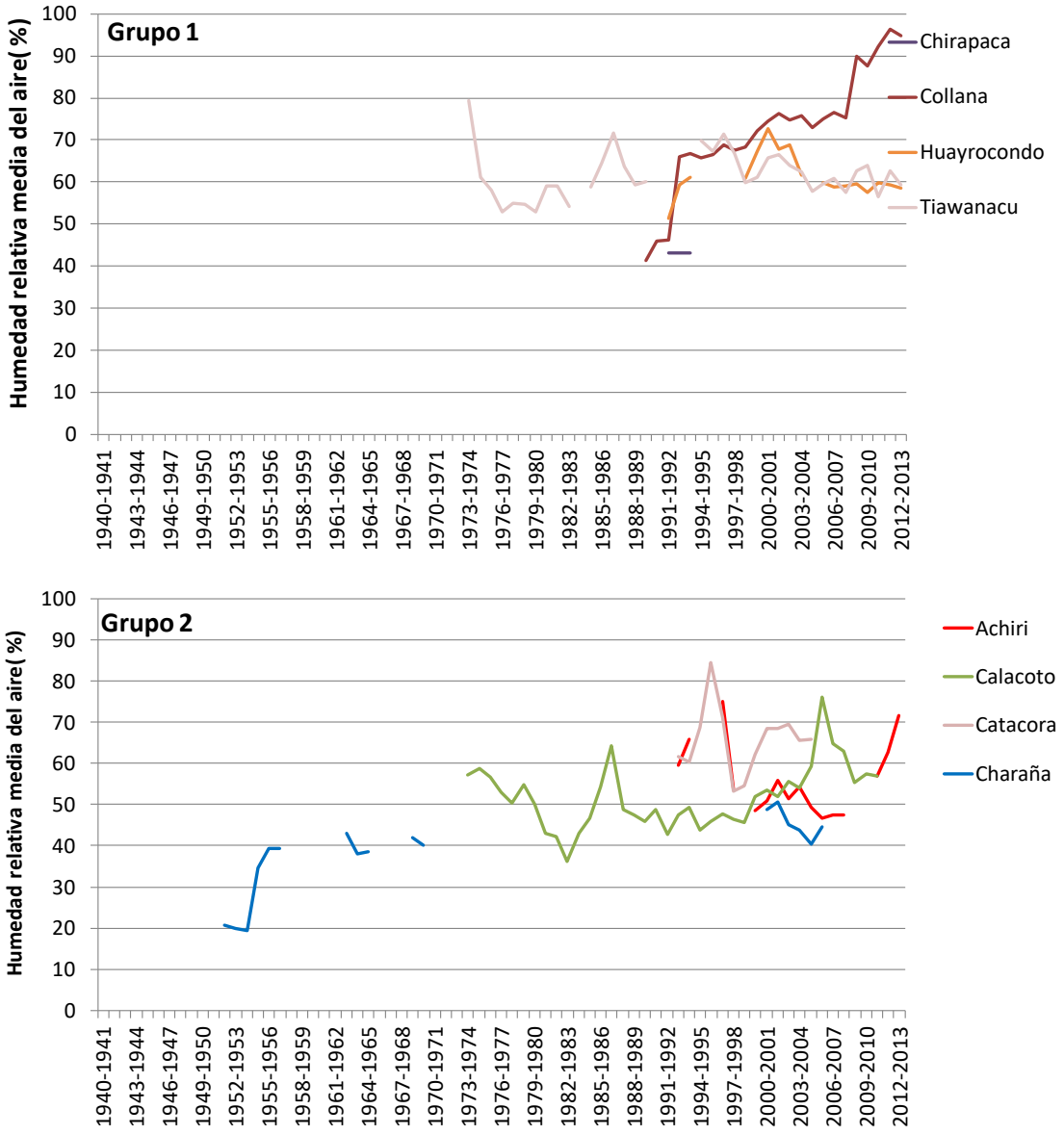


Figura 10 Series anuales de humedad relativa del aire, en los grupos 1 y 2

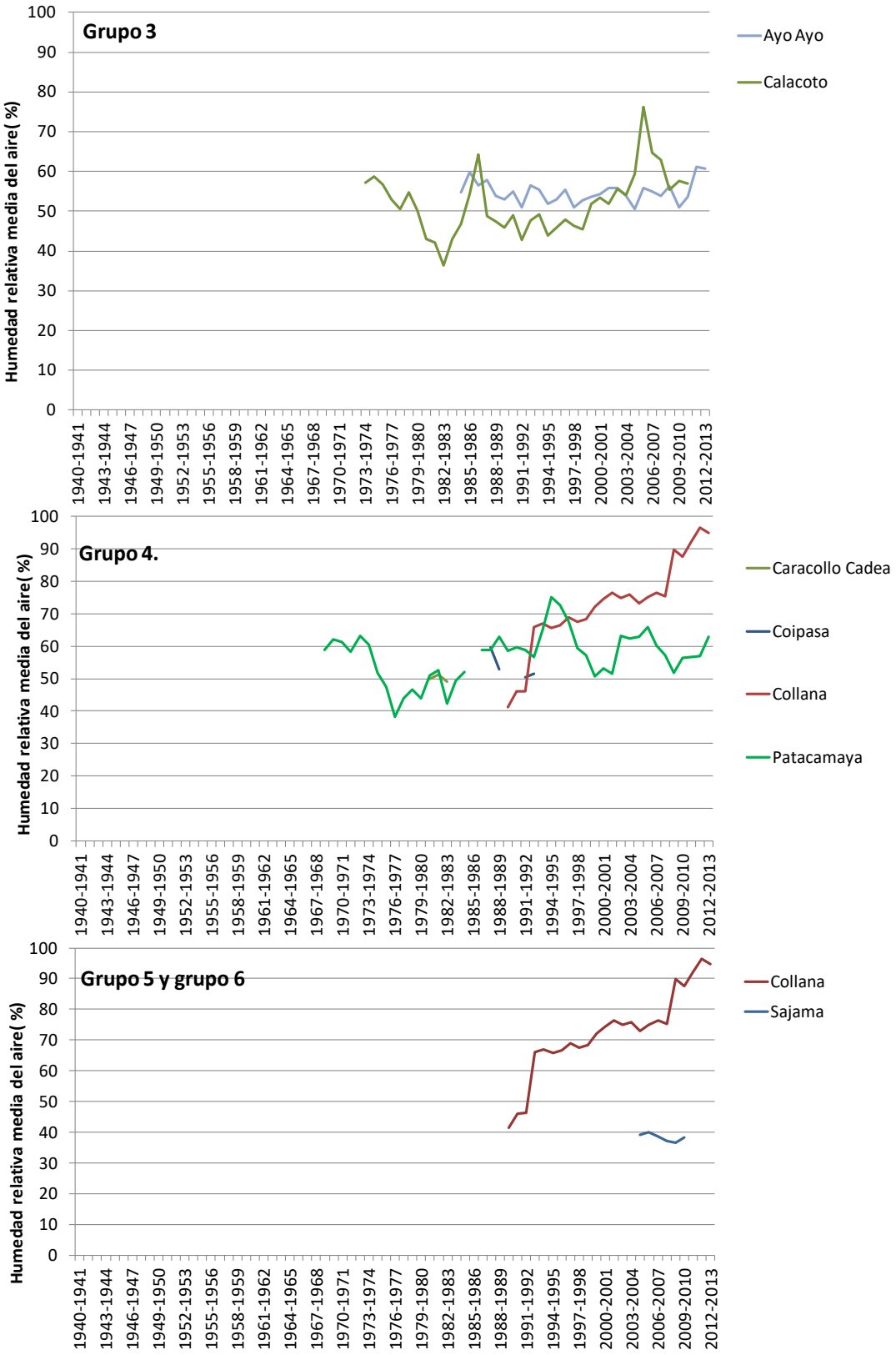


Figura 11 Series anuales de humedad relativa del aire, en los grupos 3 y 4

3.3.3 Series anuales de velocidad media del viento. Consistencia y tendencias

- Grupo 1.

Notas.

- Se omitió el periodo 1974-1990 en la serie Tiahuanacu.

- Grupos 2, 3, 4, 5 y 6.

Notas.

- Las series tienen tendencias variables. Complejo identificar errores, a escala media anual.

Tendencias en la serie de velocidad media del viento

Las tendencias del grupo 1 (figura 12), a través de las estaciones Collana y San Juan Huancollo, sugieren que la velocidad del viento tiene tendencia nula. El resto de las estaciones presentan datos donde la velocidad del viento fue medida de manera irregular, por tanto, sus tendencias son impredecibles.

3.3.4 Series anuales de evaporación de tanque. Consistencia y tendencias

En general, la evaporación de tanque (figura 13) en la zona de Patacamaya (grupo 4) reporta valores mayores a los de la zona del grupo 1 (Chirapaca, Huayrocondo, Tiahuanacu). Las tendencias de la variable, a través de las series Patacamaya y Tiahuanacu, sugieren un comportamiento en dos etapas. La primera etapa tiene sentido descendente, durante el periodo que abarca los años antes del año hidrológico 2003-2004. La segunda etapa, apoyada por los registros de Huayrocondo, sugiere una tendencia con sentido ascendente a una tasa de 0.11 mm por año. Estas tendencias no tienen soporte en las tendencias encontradas para la variable temperatura media del aire (anual) ni en la tendencia para la insolación diaria medida en la estación Patacamaya en hrs sol por día, que a su vez tiene tendencia de crecimiento en sentido positivo a una tasa de 0.019 hrs (figura 14).

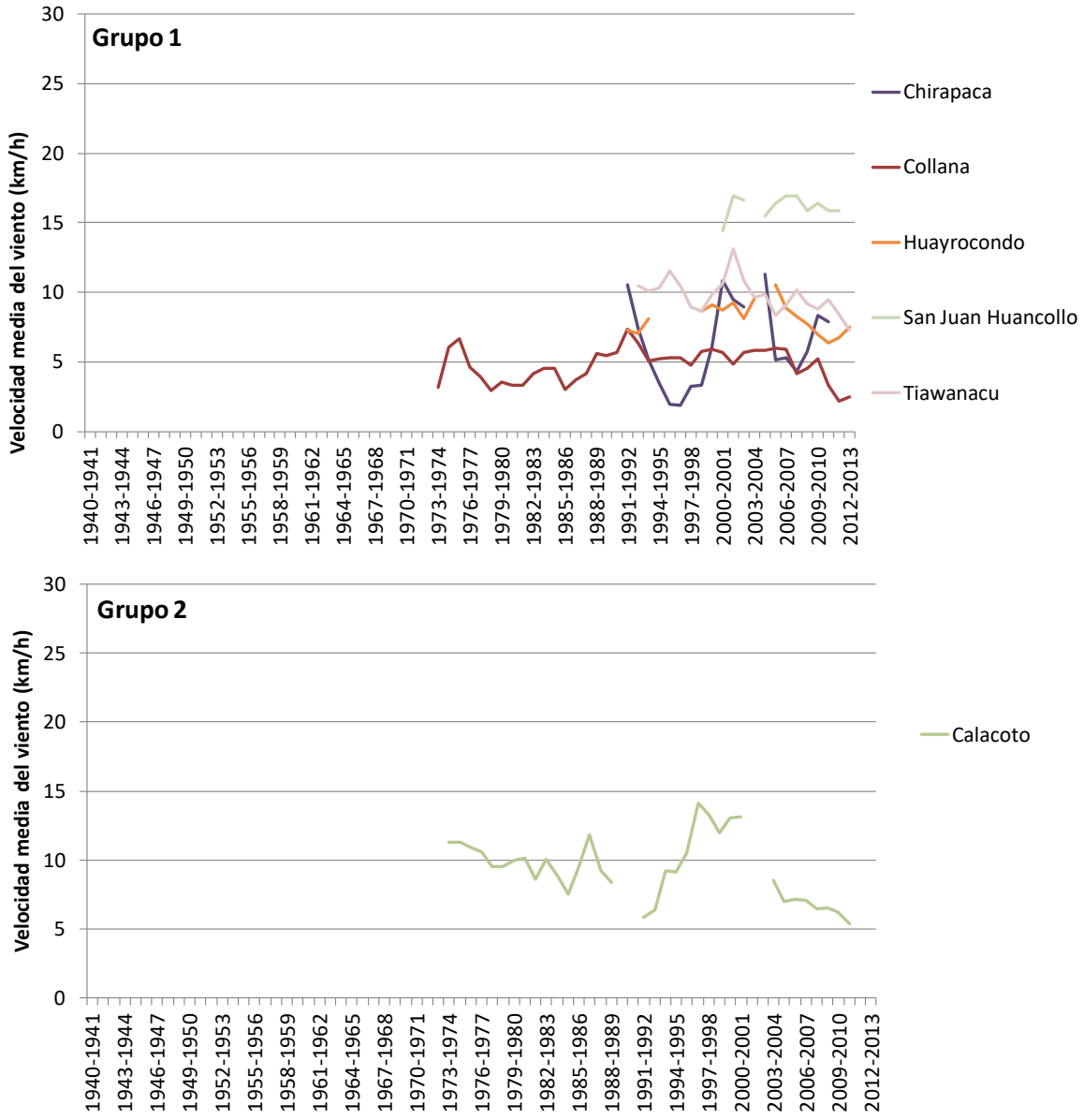


Figura 12 Series anuales de velocidad media del viento, en los grupos 1, 4, 5 y 6

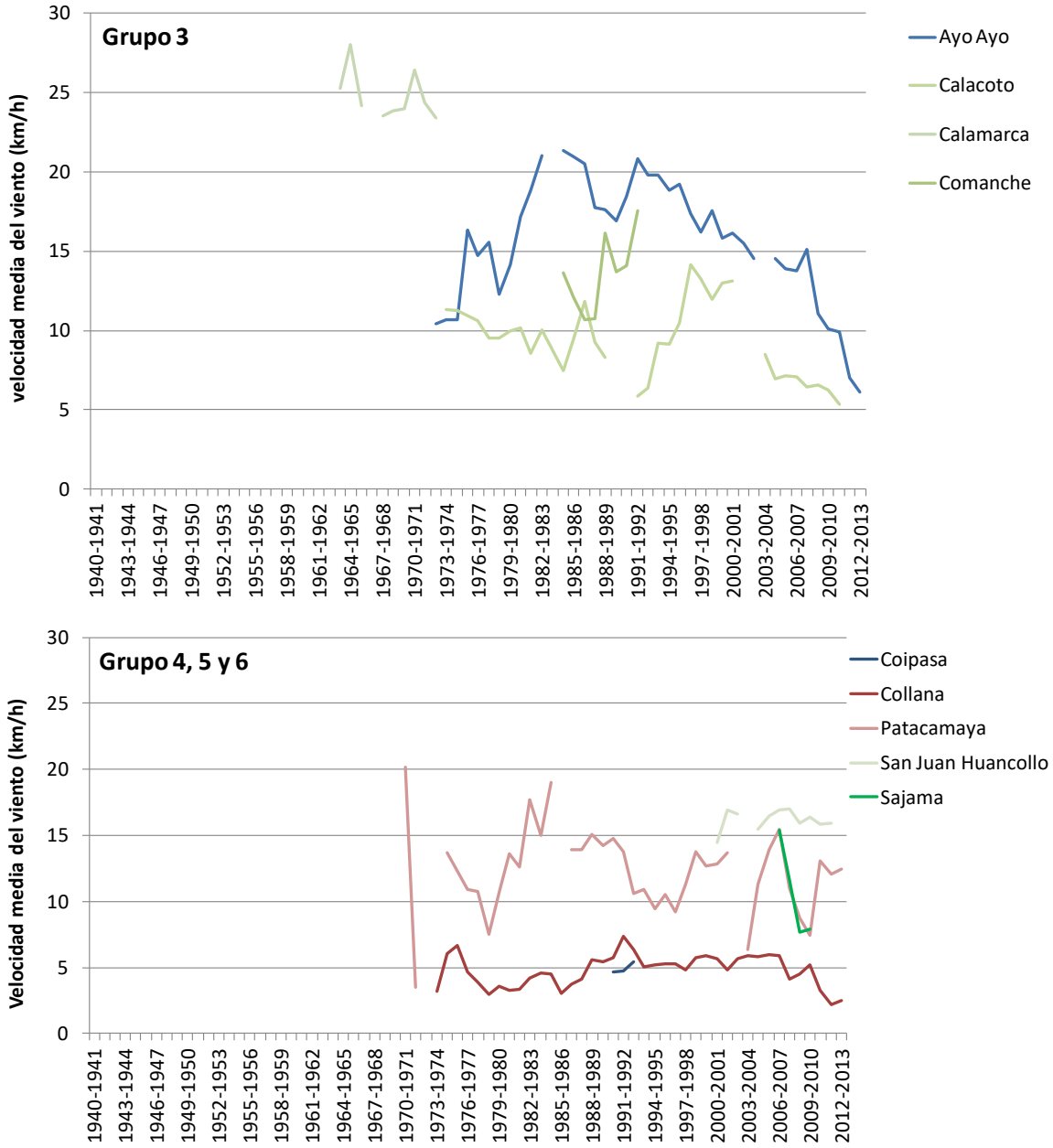


Figura 13 Series anuales de velocidad media del viento, en los grupos 3 a 6

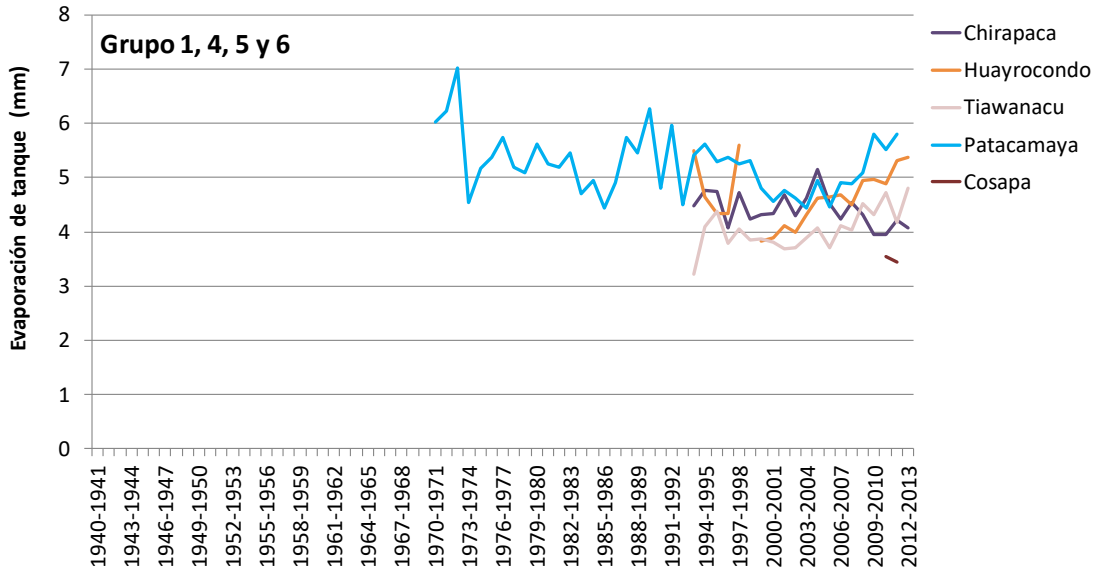


Figura 14 Series anuales de evaporación de tanque, en los grupos 1, 4, 5 y 6

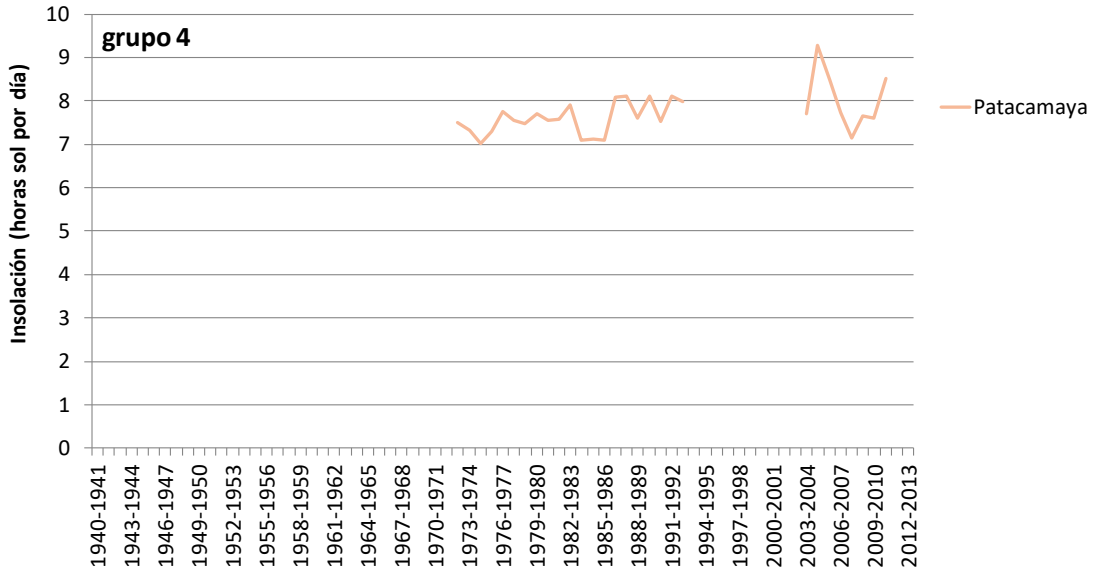


Figura 15 Series anuales de insolación (horas sol por día), en la estación Patacamaya

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La variabilidad climática en zonas de montaña es un tema discutido y por demás relevante para la comunidad científica e ingenieril. El estudio presentado constituye el primer paso en este tipo de análisis, contiene alta relevancia para estudios posteriores y atrae implícitamente la atención de los tomadores de decisión y de los responsables del mantenimiento de la red de información hidro climática del país. La región Sajama tiene información limitada, con registros históricos cortos que no permiten definir tendencias para ninguna de las variables analizadas. Por esta razón, las tendencias identificadas en las variables medidas en las regiones adyacentes proporcionan relevante para la regionalización del conocimiento.

Particularmente, la información de las estaciones de la región sugieren que en general no debería esperarse que el comportamiento de la precipitación a escala anual en la variable precipitación anual siga una tendencia de crecimiento o disminución sostenida. Tal conclusión se alcanza luego de observarse que en ninguno de los seis grupos ubicados dentro de un área que se desarrolla desde la ribera sur del Lago Titica, hasta el sector del Altiplano sur que alcanza los límites del Lago Poopó, tiene información que sugiere una tendencia de la precipitación en un solo sentido (positivo o negativo).

El comportamiento de la variable temperatura anual media del aire presenta un comportamiento que sugiere el incremento sostenido de la variable para toda la región analizada, incluida la región del Sajama. Lo complejo y en este momento imposible de definir es cuál es el rango que aplica para la región Sajama, dado que los registros de las estaciones indican, realizando una descripción en sentido norte-sur, que las tasas de incremento de la temperatura anual media del aire varia para el periodo 1974-2012 desde 0.12 ^{o}C por década en la región sur de la cuenca del Lago Titicaca, 0.33 ^{o}C por década al sud y sudoeste de la cuenca del Lago Titicaca, 0.16^{o}C por década al norte y noreste del Parque Nacional Sajama y de 0.42^{o}C por década en la cuenca del Lago Poopó.

El incremento de la humedad relativa anual media del aire en el rango de 0.02% por año en Ayo Ayo hasta 0.27% por año en Calacoto, sugieren que en la región Sajama también se debería esperar un incremento; sin embargo, dada la ausencia de registros extenso, no es posible definir la magnitud aplicable a la cuenca del río Sajama.

En cuanto al comportamiento de las series anuales de velocidad media del viento y evaporación de tanque, la posibilidad de predecir lo que podría ocurrir en la cuenca del río Sajama tiene menor probabilidad de éxito, dado que las mediciones registradas en las estaciones de la región analizada, presentan un comportamiento complejo e impredecible, con excepción de Collana y San Juan Huancollo, donde la velocidad del viento tiene tendencia nula.

AGRADECIMIENTOS

El apoyo del personal del SENAMHI en el monitoreo de la red hidrometeorológica de Bolivia y la recolección de los datos hizo posible la realización del presente estudio. Se agradece el apoyo del personal de Agua Sustentable en la logística y a COSUDE en la financiación del proyecto. El apoyo

del consultor Horacio Lorini y las pasantes Vilma Alanoca y Viviana Apaza en el trabajo de campo y sus valiosos comentarios en las discusiones.

6. REFERENCIAS

Chow, V., Maidment, D., Mays, L., 1988. Hidrología aplicada. McGraw-Hill, Nueva York.

Iriarte, J., 2005. Balance hídrico microregional de las cuencas Mauri, Bajo Desaguadero y los lagos Poopó y Uru Uru. Tesis de grado. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.

Kottegoda, N. y Rosso, R., 1997. Estadística, probabilidad y verosimilitud para ingenieros civiles y ambientales. Mc Graw Hill, Nueva York.

WMO (Organización Meteorológica Mundial), 2011. Guía a prácticas climatológicas - WMO No. 100. Tercera Edición. Ginebra.

ORSTOM, 1972. Utilización del programa VECREG. ORSTOM, Paris.

Rodríguez, E., Morris, C., Belz, J., Chapin, E., Martin, J., Daffer, W., Hensley, S., 2005. Asesoramiento de los productos topográficos del SRTM. Reporte Técnico JPL D-31639, California.

Soria, F., 2004. Modelos hidrológicos para la evaluación de los recursos hídricos en la gestión del agua. Tesis de grado. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.

UNESCO, 1982. Guía Metodológica para la Elaboración del Balance Hídrico de América del Sur. Grupo de Trabajo Regional para la elaboración de la Metodología para un eventual Balance Hídrico de América del Sur, ROSTLAC (UNESCO), Uruguay.

.