

BALANCE HÍDRICO

J. Cancelo González, M. E. Rial Rivas, F. Díaz-Fierros Viqueira

Dpto. Edafoloxía e Química Agrícola. Facultade de Farmacia. USC

Campus Sur. 15782 Santiago de Compostela.

Correo_e: edcancel@usc.es, edmitas@usc.es, eddfierr@usc.es

RESUMO

Estúdase o poder evaporante da atmosfera en catro estacións meteorolóxicas de Galicia desde o ano 1969 ata 2004. Os datos de evaporación en baño-clase A, con series de máis curta duración, presentan todos unha tendencia non significativa á diminución. A evapotranspiración potencial, calculada pola fórmula de Turc (1961) baseada na temperatura e na radiación incidente, amosa unha tendencia ao incremento deste parámetro, malia que as tendencias da radiación son dun xeito xeral e significativo na maioría dos casos de diminución como consecuencia dun incremento da nebulosidade no período estudado. O balance hídrico resultante (déficits e excedentes de auga anuais) da relación entre a demanda en auga determinada pola ETP e a oferta, pola precipitación, non sinala ningunha tendencia significativa, agás o caso de Santiago de Compostela no relativo ao exceso de auga anual, que se incrementa. O cálculo do balance hídrico polo método do Thorthwaite-Matter (1955), que ten en conta a evapotranspiración real, tampouco sinala tendencias significativas nos valores anuais. Só nos valores mensuais do contido en auga utilizable polas plantas, do mes de xuño, se aprecia unha tendencia significativa á súa diminución.

SUMMARY

A study into the evaporating power of the atmosphere at four meteorological stations in Galicia from 1969 to 2004. The evaporation data in class A pan, which has shorter series, all reveal a decreasing trend, albeit not significant. The potential evapotranspiration, calculated using the Turc formula (1961) based on temperature and incidental radiation, shows an increasing trend for this parameter, in spite of the fact that the radiation tendencies in most cases are generally and significantly decreasing, as a result of an increase of cloud cover during the study period. The resulting water balance (deficits and surpluses of annual water) of the relationship between the water demand established by the ETP and availability, by precipitation, does not show any significant trend, except in the case of Santiago de Compostela, which increases with regard to the excess of annual water. The calculation of the water balance using the Thorthwaite-Matter (1955) method, which takes the real evapotranspiration into account, does not display significant tendencies in the annual values either. Only a significant decreasing trend is detected in the monthly values for the volume of water used by plants in the month of June.

INTRODUCIÓN

O balance hídrico pódese definir como a relación que existe entre a oferta e a demanda meteorolóxicas de auga. A oferta relaciónase coa precipitación recollida e a demanda coa evaporación, ou mellor co parámetro definido como evapotranspiración. A relación que se pode establecer a diferentes escalas temporais (anuais, mensuais, etc.) entre estes dous parámetros que determinan a oferta e a demanda en auga dunha localidade é o mellor xeito de definir o concepto que podemos denominar como “economía da auga”. E así, as situacións de déficit en auga que caracterizan os períodos de secas pódense avaliar perfectamente dun xeito cuantitativo a partir do balance hídrico. Igualmente, os excesos de precipitación, tamén avaliábles, pódense

relacionar cos caudais dos ríos, as recargas dos acuíferos ou con determinados eventos extremos como as cheas, alagamento de terras, etc.

Neste traballo analizarase a evolución temporal do balance hídrico de observatorios meteorolóxicos característicos do clima galego. Nel farase unha breve consideración sobre os datos de evaporación recollidos na comunidade galega e, finalmente, un estudo sobre a evolución da evapotranspiración e dos parámetros necesarios para a súa determinación. Por último, definirase o balance hídrico para as series máis características do clima galego.

Evaporación

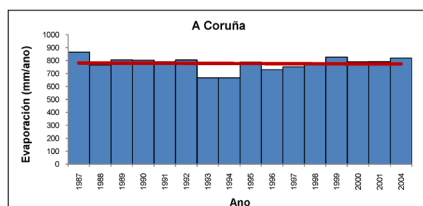
En Galicia realízanse medidas de evaporación en garita meteorolóxica mediante o evaporímetro Piche desde os inicios dos observatorios máis antigos, no século XIX (Santiago de Compostela, A Coruña, A Guarda, etc.). Polo tanto, poderíanse recoller series centenarias deste parámetro. Non obstante, está hoxe perfectamente establecido que a pequena dimensión da superficie evaporante deste aparello introduce fortes distorsións na medida cando quere ser utilizada como referencia da evaporación de auga de superficies dunha certa dimensión, cultivos, bosques, lagoas, encoros, etc. Por iso, esta medida foi substituída, nas estacións meteorolóxicas, sobre todo a partir da segunda metade do pasado século, polas medidas de evaporación en baño, que mediante coeficientes sinxelos poden servir como unha boa referencia do poder evaporante da atmosfera (Smith, 1990).

As primeiras medidas, contrastadas e publicadas, de evaporación en baño do tipo US clase A efectuadas en Galicia foron as realizadas por Díaz-Fierros e Paz González en Santiago de Compostela para o período 1969-1977¹. Posteriormente, foron continuadas por un período de tres anos por Méndez Domenech, E., no colexio Fingoi de Lugo. A partir dos anos oitenta, o SMN comezou a súa medida nas estacións completas do servizo, polo que serán estas series as que poidan servir de referencia da evolución temporal deste parámetro en Galicia. Despois de realizar unha pormenorizada depuración das bases de datos correspondentes, puidéronse establecer series temporais de medidas de evaporación para os seguintes observatorios: A Coruña, Santiago-A Lavacolla, Lugo-Rozas, Ourense-Granxa Deputación e Pontevedra-Mourente.

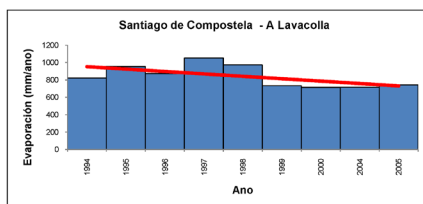
A diminución que se observa nos datos da evaporación en baño no conxunto dos observatorios galegos que a miden (agás nos casos da Coruña e Mourente) non ten aínda unha lonxitude suficiente de anos (entre 9 e 16 anos) como para tirar conclusións estatisticamente significativas. De todas maneiras, son datos que concordan con outros estudos de carácter máis xeral noutros países (Wild *et al.*, 2004; Walter *et al.*, 2004; Hobbins *et al.*, 2004 ou Quian *et al.*, 2006) nos que se observa este mesmo comportamento para as últimas décadas, coincidencia que serviría para reforzar a validez dos resultados atopados en Galicia, situación que sería xustificada pola diminución da radiación incidente, que é un dos parámetros que ten maior influencia sobre a evaporación. Esta diminución da radiación poderíase explicar, á súa vez, polo incremento de aerosois na atmosfera como consecuencia da contaminación (IPCC, 2007). En Galicia non é importante a presenza de aerosois na atmosfera agás no contorno das térmicas das Pontes e Meirama e nas cidades de Vigo e A Coruña (Consellería de Medio Ambiente, 2007), polo que habería que especular con fenómenos de máis longo alcance como causa desta probable diminución da radiación nas últimas décadas.

¹ Existiron medidas en baño desde comezos dos sesenta nalgúns encoros galegos de saltos do Sil, pero na actualidade son de moi difícil ou case imposible localización.

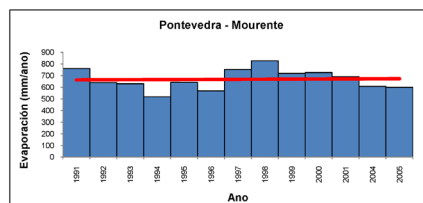




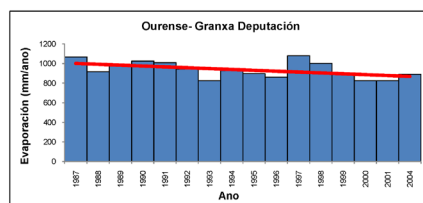
Nº anos observados	16
Desde	1987
Ata	2004
Pendente	-0,487
t	-0,164
Sig.	0,872



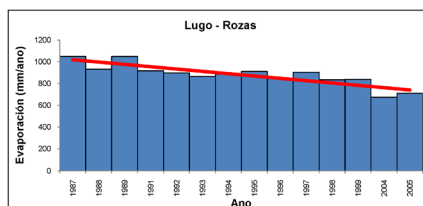
Nº anos observados	9
Desde	1994
Ata	2005
Pendente	-27,737
t	-1,98
Sig.	0,088



Nº anos observados	13
Desde	1991
Ata	2005
Pendente	0,836
t	0,124
Sig.	0,904



Nº anos observados	16
Desde	1987
Ata	2004
Pendente	-8,865
t	-2,176
Sig.	0,047



Nº anos observados	14
Desde	1987
Ata	2005
Pendente	-21,370
t	-5,891
Sig.	<0,001

Figura 1. Valores da evaporación en baño-clase A nos observatorios da Coruña, Lugo-Rozas, Ourense-Granza Deputación e Pontevedra-Mourente. En vermello exprésase a tendencia da serie e no recadro da dereita os estatísticos correspondentes.

Evapotranspiración

Este é un termo que define moito mellor a demanda en auga da atmosfera que o propio de evaporación. Desde un punto de vista físico, estase a falar nos dous casos do mesmo proceso de cambio de estado da auga de líquido a vapor, pero, cando se fala dos métodos de medida, no caso de evaporación refírese ao cambio de estado dunha superficie de auga libre, mentres que no da evapotranspiración o proceso é moito máis complexo, pois ten en conta simultaneamente a evaporación das superficies vexetais e a transpiración a partir dos estomas das plantas. Existen aparellos para a súa medida, pero, tendo en conta a dificultade da súa instalación e mantemento, o máis corrente é o seu cálculo mediante fórmulas de diferente grao de complexidade. Nelas é importante distinguir dúas situacións que van incidir sobre as características das fórmulas: o cálculo da ET (evapotranspiración) en situacións dun abastecemento óptimo da auga das plantas polo solo, a denominada evapotranspiración potencial ou ETP, e cando existe déficit de auga no solo, ou ET real ou actual (ETR). No primeiro caso resulta, na práctica, un parámetro dependente de factores climáticos, que se pode interpretar como “o poder evaporante do aire”, e no segundo hai que ter en conta, ademais, factores edáficos e vexetais, polo que as fórmulas e métodos de cálculo resultan bastante máis complexos.

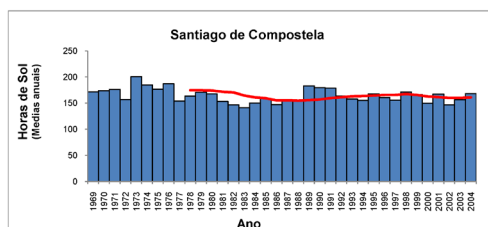
Para o cálculo da ETP existen moitas fórmulas, pero como exemplo das máis significativas e utilizadas poderíanse sinalar as que teñen base só na temperatura, como a de Thornthwaite (1948); na temperatura e na radiación, como a de Turc (1961), e na temperatura, radiación, humidade do aire e velocidade do vento, como a de Penman (1960). As tres foron avaliadas en Galicia con medidas experimentais por Díaz-Fierros e Guitián (1971) e por Paz González e Díaz-Fierros (1978), chegándose á conclusión de que é a de Penman a que fornece un mellor axuste, seguida pola de Turc e, finalmente, pola de Thornthwaite. Para este estudo poderíase ter utilizado a de Penman, pero, despois dunha análise dos datos de vento que precisa esta fórmula para o cálculo do seu importante termo aerodinámico, chegouse á conclusión de que na maioría das estacións completas galegas non existía garantía de que este parámetro fose medido ao longo de toda a serie temporal dunha maneira homoxénea e rigorosa. Por este motivo, desbotouse a utilización da fórmula de Penman e decidiuse empregar a de Turc, que precisaba só medidas de radiación e de temperatura, parámetros para os que existían series longas e de garantía.

No caso das series de temperatura, foron suficientemente analizadas neste mesmo libro (Cruz *et al.*, 2008), demostrándose o incremento continuado deste parámetro ao longo de, cando menos, os últimos trinta anos. Para o caso da radiación, as medidas directas mediante radiómetros con base en termopares (que son os máis recomendables) teñen en Galicia aínda pouca extensión temporal, polo que non podían ser utilizadas neste estudo sobre a evolución da ET das últimas décadas. Porén, o cálculo da radiación mediante a fórmula de Amgstron, que toma como base as medidas de horas de sol, demostrou que ofrecía suficiente garantía e rigor, sobre todo despois dun debido axuste das constantes da fórmula (Paz González e Díaz-Fierros, 1981). Neste caso, as medidas de horas de sol mediante o piranómetro de Campbell-Stokes, ademais de ser sinxelas e susceptibles de poucos erros, dan lugar en Galicia a varias series temporais de longa duración. Para este estudo escolléronse as series da Coruña, Santiago-Observatorio, Vigo-Peinador e Lugo-Rozas-Punto Centro para o período 1969-2004.

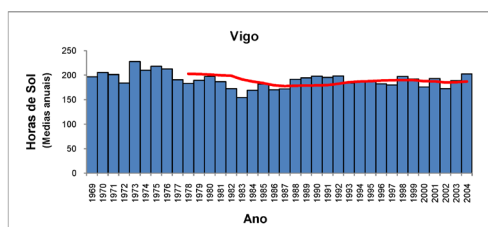
A análise das medidas de horas de sol dos catro observatorios, dentro das agardadas variacións interanuais, presenta nos casos dos observatorios máis influídos polas borrascas atlánticas do oeste unha tendencia á súa diminución ao longo do período estudado que só resulta significativa a un nivel de P igual a 0,05, no caso de Vigo. Así mesmo, as medias móbiles decenais dos catro observatorios mostran un mínimo no contorno do ano 1983, seguido dun máximo menos significativo no contorno do ano 1990. Esta tendencia á diminución da insolación, agás no caso da Coruña,



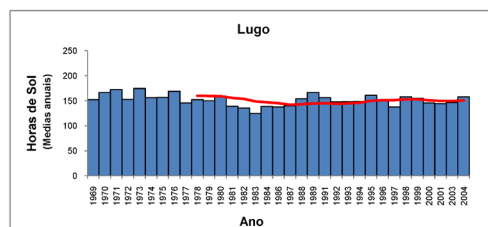
podería estar relacionada co incremento da nebulosidade, xa comentado, detectado por diferentes autores desde os anos cincuenta do pasado século (Dai *et al.*, 2006). De todas maneiras, estes datos non se axustan ben con outros nos que se detectan un incremento das horas de sol a partir dos anos noventa e, sobre todo, cos datos de satélite, de nebulosidade en altura, que ofrecen datos moi contraditorios (IPCC, 2007). En calquera caso, o posible incremento da nebulosidade como consecuencia da contaminación por aerosois considérase na actualidade unha cuestión aberta (IPCC, 2007) e, por suposto, a lixeira tendencia observada nos observatorios galegos á diminución das horas de sol (só significativa nun deles) polo incremento da nebulosidade non se contradí co estado científico actual da cuestión.



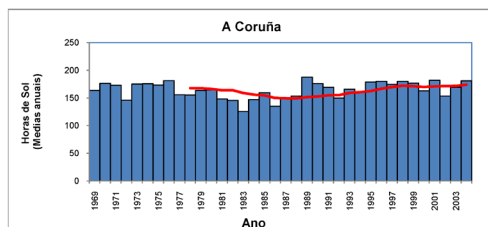
Nº de anos observados	36
Desde	1969
Ata	2004
Pendente	-0,417
t	-2,038
Sig.	0,049



Nº de anos observados	36
Desde	1969
Ata	2004
Pendente	-0,451
t	-1,978
Sig.	0,056



Nº de anos observados	33
Desde	1969
Ata	2004
Pendente	-0,337
t	-1,686
Sig.	0,102



Nº de anos observados	36
Desde	1969
Ata	2004
Pendente	0,273
t	1,159
Sig.	0,255

Figura 2. Datos de horas de sol dos observatorios de Santiago de Compostela, Vigo, A Coruña e Lugo para o período 1969-2004. Preséntase en vermello a media móbil decenal e nos estatísticos do recadro dereito os correspondentes á tendencia da serie.

No cálculo da radiación incidente mensual mediante a fórmula de Armstrong interveñen, ademais das horas de sol, a duración da insolación máxima diaria, que depende da latitude, e a irradiancia solar no límite da atmosfera, que, así mesmo, se calcula como un valor constante dependente só da latitude. Neste último caso, habería que sinalar que a escala secular existe unha variación cíclica da irradiancia, dependente das manchas solares, pero, tendo en conta que a súa variabilidade é inferior ao 0,1% (Fröhlich, 2004), non se valorou neste estudo. Os datos da radiación incidente, loxicamente, traducen a mesma tendencia á súa diminución, que foi observada no caso das horas de sol, polo que só se consignan os seus valores anuais para os catro observatorios estudados, na táboa 1.

Táboa 1. Radiación incidente, calculada mediante a fórmula de Amgstrom (expresada en cal. cm⁻². ano⁻¹) para os observatorios da Coruña, Vigo, Santiago de Compostela e Lugo para o período 1969-2004.

Santiago de Compostela

Ano	Xaneiro	Febreiro	Marzo	Abril	Maio	Xuño	Xullo	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Decembro	Media
1968	118,57	123,51	206,88	282,41	354,18	389,26	370,02	320,99	224,51	169,15	110,34	58,60	227,4
1969	103,06	174,52	192,53	280,89	302,22	347,37	437,25	371,87	224,51	207,68	122,54	59,72	235,3
1970	87,13	131,05	231,01	302,10	359,61	328,84	391,66	332,05	245,01	232,80	112,15	75,91	235,8
1971	90,90	198,29	241,45	241,50	301,44	353,01	370,02	315,09	282,60	204,33	135,19	79,26	234,4
1972	98,03	133,94	199,70	311,95	308,42	353,01	363,83	343,85	259,36	162,45	117,57	61,95	226,2
1973	116,48	152,49	263,62	339,98	323,16	424,71	361,51	374,82	262,78	198,19	151,91	68,37	253,2
1974	83,65	152,96	217,84	316,49	372,95	394,90	452,25	366,04	218,36	177,42	114,86	80,01	245,6
1975	105,75	144,84	195,59	289,22	346,50	370,73	394,75	377,47	234,76	173,95	122,99	85,20	236,8
1976	142,13	149,71	231,99	309,68	368,14	443,24	394,75	329,47	259,36	147,99	124,34	58,38	246,6
1977	107,05	117,25	205,70	291,50	296,02	368,31	344,43	327,18	281,92	173,95	101,30	67,03	223,5
1978	100,55	126,99	203,68	243,77	310,44	336,90	404,33	372,90	271,67	205,11	135,19	51,46	230,2
1979	104,45	133,48	185,48	280,13	332,08	428,74	418,71	336,33	265,51	163,57	127,06	62,70	236,5
1980	99,25	148,09	197,62	330,13	310,44	356,23	399,54	340,90	259,36	170,49	113,50	70,49	233,0
1981	121,34	165,94	171,33	293,77	247,94	404,57	389,96	308,90	218,36	146,26	147,39	52,32	222,3
1982	105,75	136,73	234,01	339,22	324,87	298,23	318,08	331,76	236,81	158,38	95,88	55,78	219,6
1983	108,34	120,49	213,79	230,14	284,00	373,15	296,52	270,04	257,31	199,92	104,01	79,14	211,4
1984	83,65	159,45	205,70	277,86	264,76	351,40	363,60	361,47	255,26	184,34	94,52	61,84	222,0
1985	105,75	133,48	197,62	273,32	305,63	334,48	354,02	359,19	271,67	205,11	110,79	62,70	226,1
1986	87,55	112,38	193,57	243,77	344,10	375,57	413,91	304,33	218,36	179,15	118,92	59,24	220,9
1987	104,45	143,22	207,73	243,77	384,97	358,65	387,56	336,33	238,86	134,14	112,15	60,97	226,1
1988	86,25	161,07	211,77	236,95	269,57	332,06	346,83	352,33	269,62	161,84	139,25	80,88	220,7
1989	138,24	169,19	229,97	259,68	368,14	385,23	413,91	350,04	290,12	194,72	89,10	48,00	244,7
1990	103,15	123,74	268,39	255,13	370,54	361,06	416,31	372,90	269,62	163,57	112,15	74,82	240,9
1991	107,05	148,09	191,55	311,95	401,79	385,23	363,60	363,76	255,26	179,15	113,50	69,63	240,9
1992	140,83	185,42	215,40	265,00	348,91	327,23	380,37	318,04	247,06	147,99	94,52	67,03	228,2
1993	106,50	188,67	231,99	257,41	264,76	365,90	428,29	356,90	216,31	158,38	108,08	48,86	227,7
1994	91,45	131,86	240,08	296,04	300,82	411,82	361,21	302,04	238,86	156,64	121,63	59,24	226,0
1995	87,55	136,73	229,97	355,13	334,48	423,90	342,04	356,90	232,71	179,15	95,88	60,11	236,2
1996	91,45	141,60	219,86	289,22	312,84	421,48	385,40	313,47	259,36	175,68	95,88	60,97	230,6
1997	99,25	133,48	298,71	316,49	298,42	298,23	387,56	295,18	275,77	168,76	87,75	54,92	226,2
1998	96,65	187,04	246,14	232,41	353,71	375,57	387,56	388,90	210,16	161,84	114,86	67,03	235,2
1999	95,10	173,94	223,84	283,16	335,80	394,90	387,02	327,63	229,98	155,75	125,70	61,95	232,9
2000	126,12	132,78	253,84	209,68	313,85	384,43	360,74	335,74	258,68	159,10	91,81	43,81	222,5
2001	73,72	170,46	152,09	298,31	354,18	402,15	338,33	325,41	302,42	155,75	136,09	78,98	232,3
2002	85,87	133,36	238,84	293,01	335,80	346,56	373,88	338,69	240,91	155,19	80,97	52,46	223,0
2003	107,25	125,83	202,96	273,32	386,75	351,40	359,97	327,63	272,35	163,01	103,56	54,42	227,4
2004	90,49	186,12	213,40	311,95	334,79	399,73	359,97	304,77	257,31	141,79	127,96	69,77	233,2



Vigo

Ano	Xaneiro	Febreiro	Marzo	Abril	Maio	Xuño	Xullo	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Decembro	Media
1950	133,7	138,3	242,0	364,6	346,2	367,5	420,5	391,0	269,9	198,0	96,4	63,7	252,7
1951	90,7	131,2	237,5	336,4	380,5	422,5	424,3	383,6	278,1	206,4	101,0	67,2	255,0
1952	81,4	200,2	179,2	318,8	378,1	446,8	469,2	349,5	295,3	149,5	134,8	60,2	255,3
1953	130,3	191,4	291,8	300,5	398,3	429,0	423,6	402,9	283,0	196,8	137,6	67,2	271,0
1954	121,0	177,4	194,3	357,7	411,6	431,4	472,3	351,0	263,0	205,3	110,6	80,2	264,7
1955	78,8	137,1	252,5	334,1	361,0	403,9	426,7	384,3	313,9	209,3	140,3	60,7	258,6
1956	106,5	214,2	241,4	304,3	399,1	443,5	419,7	348,1	243,8	228,4	139,4	69,9	263,2
1957	124,4	124,8	186,4	363,8	378,9	395,0	459,2	389,5	269,9	223,9	146,3	70,8	261,1
1958	112,9	167,5	192,3	351,6	360,2	380,4	383,3	351,0	250,0	217,7	158,2	50,2	247,9
1959	89,0	205,4	189,0	289,1	371,9	398,2	429,0	360,6	284,3	191,8	119,3	47,5	247,9
1960	101,4	134,2	210,0	351,6	366,5	433,8	417,4	358,4	267,8	169,2	106,5	59,6	248,0
1961	98,8	167,5	294,4	257,1	371,9	423,3	439,0	416,2	274,7	166,4	121,1	57,2	257,3
1962	112,0	206,6	202,1	326,5	399,1	454,1	439,0	378,4	243,8	213,8	123,9	65,9	263,8
1963	101,8	130,7	202,1	341,7	434,9	407,9	437,5	379,2	278,8	220,0	103,3	71,3	259,1
1964	140,1	166,9	202,8	308,2	364,9	420,9	438,3	399,9	280,9	218,3	149,9	81,0	264,3
1965	116,3	197,9	211,3	312,7	423,2	410,4	423,6	408,8	265,8	181,1	114,3	49,1	259,5
1966	85,6	125,4	310,1	307,4	423,2	346,5	463,0	365,8	296,0	175,4	127,5	73,7	258,3
1967	112,0	180,9	260,4	363,1	327,6	479,9	403,4	361,4	242,4	186,1	137,6	77,8	261,1
1968	126,5	134,7	235,5	301,3	370,3	463,8	420,5	357,7	230,7	173,7	117,5	62,4	249,5
1969	103,1	187,3	211,9	302,1	343,1	386,1	473,1	398,4	247,2	204,2	133,0	60,7	254,2
1970	90,3	144,7	260,4	344,8	324,5	373,2	455,3	365,8	285,0	256,6	119,7	79,7	258,3
1971	95,4	213,0	248,6	289,9	311,3	398,2	397,2	298,4	311,8	230,1	156,8	77,3	252,3
1972	105,2	140,6	206,0	347,0	354,8	398,2	384,8	382,9	276,8	173,7	124,3	63,4	246,5
1973	127,4	182,1	284,6	361,5	346,2	450,8	418,1	370,3	289,8	195,2	157,3	78,6	271,8
1974	96,7	169,2	244,0	342,5	319,8	401,5	466,1	377,7	261,6	216,0	130,7	93,8	260,0
1975	115,4	144,7	235,5	357,0	380,5	423,3	430,5	399,9	255,5	202,5	145,8	92,2	265,2
1976	150,3	176,8	257,1	344,0	419,3	471,8	431,2	364,4	291,2	162,4	133,0	59,9	271,8
1977	108,2	126,0	234,2	330,3	350,1	406,3	392,6	355,5	307,7	203,6	110,1	71,8	249,7
1978	103,6	139,8	212,9	249,5	342,3	359,4	445,3	388,0	289,8	217,7	139,9	52,8	245,1
1979	104,9	148,0	202,8	297,5	344,7	439,5	418,9	372,0	289,8	179,2	139,9	61,2	249,9
1980	99,6	148,0	210,9	357,0	354,3	403,1	423,7	367,4	294,0	184,5	130,3	78,0	254,2
1981	128,6	177,4	188,6	318,1	272,4	434,6	440,5	376,6	248,6	167,0	152,2	54,5	246,6
1982	119,4	151,2	251,5	340,9	354,3	342,4	339,7	388,0	246,5	165,3	104,2	56,2	238,3
1983	118,1	134,9	239,3	228,9	286,9	415,2	313,3	300,8	256,8	202,0	98,7	72,1	222,2
1984	86,4	164,3	221,0	288,3	330,2	378,8	385,3	381,2	273,3	182,7	94,6	62,0	237,4
1985	111,5	141,4	206,8	267,8	356,7	405,5	387,7	381,2	273,3	207,2	120,7	62,9	243,6
1986	90,4	116,9	198,7	276,9	361,6	427,4	435,7	342,1	230,0	188,0	123,4	64,5	238,0
1987	115,4	152,9	212,9	226,6	421,8	383,7	426,1	344,4	256,8	140,8	120,7	59,5	238,5
1988	89,0	164,3	243,3	251,7	325,4	369,1	394,9	399,5	312,5	186,2	138,5	88,1	246,9
1989	136,6	166,0	245,4	263,2	373,6	429,8	438,1	360,5	308,4	195,0	89,1	50,3	254,7
1990	106,2	123,4	281,9	292,9	390,5	383,7	426,1	388,0	285,7	170,5	128,9	75,5	254,4
1991	112,8	151,2	204,8	315,8	424,2	427,4	387,7	383,5	271,3	186,2	115,2	69,6	254,1
1992	140,5	190,5	249,4	329,5	364,0	352,1	438,1	346,7	277,5	186,2	101,5	67,1	253,6
1993	118,1	208,5	249,4	283,8	286,9	388,5	457,3	385,8	234,1	170,5	119,3	50,3	246,0
1994	108,8	139,8	253,5	334,1	327,8	444,3	416,5	346,7	263,0	161,8	127,5	58,7	248,5
1995	103,6	148,0	255,5	366,1	356,7	434,6	363,7	385,8	244,5	189,7	97,3	58,7	250,3
1996	89,0	152,9	229,1	322,6	330,2	439,5	416,5	344,4	258,9	198,5	108,3	63,7	246,1
1997	111,5	136,5	312,3	315,8	311,0	330,3	430,9	351,3	298,1	179,2	94,6	56,2	244,0
1998	100,9	193,8	263,6	256,3	356,7	434,6	430,9	392,6	228,0	182,7	122,0	77,1	253,3
1999	112,5	196,7	232,2	298,2	325,3	423,3	418,1	370,3	248,6	167,5	142,6	64,3	250,0
2000	137,2	148,2	282,0	210,6	341,6	426,5	384,8	374,0	285,0	173,2	95,5	43,4	241,8
2001	81,0	184,4	163,5	325,7	392,9	439,5	367,0	342,9	304,3	164,7	154,5	82,7	250,3
2002	96,3	152,3	244,0	334,8	323,7	386,1	417,4	382,1	245,1	161,9	91,4	55,9	240,9
2003	123,5	134,7	248,5	280,7	421,7	385,3	401,1	365,8	291,9	178,8	108,3	59,6	250,0
2004	95,9	196,1	225,7	348,6	364,9	418,5	426,7	345,1	284,3	160,7	142,2	76,4	257,1

Lugo

Ano	Xaneiro	Febreiro	Marzo	Abril	Maio	Xuño	Xullo	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Decembro	Media
1969	92,1	163,6	178,1	261,8	307,7	342,4	412,3	338,5	209,8	198,2	104,2	56,7	222,1
1970	89,7	118,3	209,9	308,4	338,7	349,6	386,0	323,9	258,6	206,5	113,9	69,5	231,1
1971	91,7	190,6	238,5	275,0	303,1	340,8	345,2	311,4	288,4	202,1	119,3	75,6	231,8
1972	86,4	136,1	197,6	302,4	304,7	340,8	375,3	329,0	260,6	174,5	104,6	62,5	222,9
1973	97,5	144,7	250,8	299,4	320,9	394,5	329,8	331,9	254,5	182,8	142,8	66,3	234,7
1974	83,1	144,7	205,4	308,4	326,3	371,3	391,4	340,7	225,4	153,6	94,4	69,2	226,2
1975	94,6	145,9	183,3	273,9	320,1	377,7	392,2	344,4	213,9	161,9	112,2	72,7	224,4
1976	116,4	153,3	237,2	264,8	356,4	417,7	375,3	333,4	240,3	148,7	109,1	56,7	234,1
1977	99,5	124,1	216,4	272,4	288,4	348,0	327,4	315,8	257,9	175,1	105,5	64,2	216,2
1978	93,0	118,9	211,2	236,3	326,3	343,2	384,5	346,6	247,1	184,5	114,4	59,9	222,2
1979	87,6	136,7	182,7	269,3	327,1	376,9	401,5	323,1	245,1	153,1	108,2	58,1	222,4
1980	89,3	141,8	198,9	327,2	294,6	343,2	375,3	343,7	257,3	167,4	111,7	67,4	226,5
1981	94,2	158,5	183,3	274,6	272,2	374,5	371,4	298,9	226,1	136,0	126,8	49,4	213,8
1982	86,4	125,2	230,1	335,4	310,1	313,6	321,3	306,3	241,0	158,6	91,7	43,3	213,6
1983	101,6	123,5	198,9	224,3	266,8	376,1	288,9	271,8	247,8	156,5	87,7	62,8	202,1
1984	70,4	133,2	207,3	280,6	256,0	334,4	372,9	345,9	260,0	171,2	88,6	57,0	214,8
1986	79,2	112,4	184,1	233,3	324,1	364,9	370,6	323,4	212,5	171,6	112,6	64,7	212,8
1987	100,8	136,5	206,2	244,6	364,9	331,2	341,9	309,7	232,8	132,3	96,6	66,5	213,7
1988	81,8	141,3	212,3	240,1	271,4	316,8	349,1	355,2	271,5	180,1	128,6	81,8	219,2
1989	111,0	147,7	228,4	266,6	343,3	340,8	392,1	327,9	287,8	188,6	92,6	56,6	232,0
1991	107,2	144,5	178,1	278,4	362,5	369,7	332,4	341,5	230,8	168,2	101,9	70,1	223,8
1992	123,8	165,4	210,3	280,6	345,7	304,8	353,9	293,8	238,9	139,1	96,6	60,2	217,8
1993	104,7	183,0	224,3	240,1	276,2	336,0	385,0	339,3	214,5	163,0	107,3	51,2	218,7
1994	91,9	141,3	228,4	267,1	312,2	372,1	339,5	316,5	226,7	164,7	116,6	58,4	219,6
1995	85,6	144,5	210,3	316,7	333,7	400,9	334,8	350,6	220,6	190,4	97,9	62,9	229,1
1996	91,9	136,5	228,4	273,9	305,0	393,7	380,2	280,2	251,2	175,0	92,6	62,0	222,5
1997	83,0	126,8	244,5	312,2	293,0	302,4	337,2	291,5	251,2	164,7	92,6	56,6	213,0
1998	99,6	171,8	242,5	228,8	338,5	355,2	368,2	346,1	220,6	161,3	99,3	66,5	224,9
1999	93,4	153,9	220,3	276,1	301,6	368,1	376,8	342,2	228,8	154,2	109,9	61,6	223,9
2000	120,9	129,8	241,7	204,0	310,1	386,5	350,6	340,7	249,8	150,9	85,9	49,4	218,4
2001	77,4	163,6	145,0	282,1	338,7	374,5	335,2	324,6	244,4	150,9	109,1	65,7	217,6
2003	90,5	128,1	209,9	268,6	366,5	339,2	330,5	328,3	259,3	147,0	103,3	60,2	219,3
2004	85,2	147,9	204,7	302,4	334,0	390,5	344,4	308,5	251,2	154,2	114,4	71,2	225,7

A Coruña

Ano	Xaneiro	Febreiro	Marzo	Abril	Maio	Xuño	Xullo	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Decembro	Media
1965	102,52	170,99	210,77	229,13	360,06	305,36	392,93	350,48	209,96	166,14	110,16	54,86	221,9
1966	89,87	140,12	268,47	289,81	360,83	326,16	403,72	331,45	241,06	152,43	98,23	56,33	229,9
1967	98,44	172,13	234,11	301,05	311,41	384,55	367,49	332,18	225,51	167,23	120,77	75,42	232,5
1968	118,02	143,55	203,64	298,06	348,47	377,35	361,33	312,42	238,36	185,33	113,70	62,50	230,2
1969	100,07	172,13	202,34	272,58	319,13	320,56	405,26	319,74	239,71	205,62	110,16	62,20	227,5
1970	96,40	131,54	234,11	314,54	333,03	329,36	383,68	321,21	268,11	222,07	114,59	75,13	235,3
1971	104,96	186,42	233,46	236,62	302,14	335,75	344,37	302,91	291,78	211,10	126,52	78,06	229,5
1972	95,17	131,54	188,73	293,56	290,56	335,75	354,39	312,42	254,59	165,04	109,72	65,73	216,4
1973	107,82	137,83	239,94	308,55	326,85	416,54	347,46	321,94	244,44	171,07	131,83	68,66	235,2
1974	87,42	138,97	209,47	295,81	342,30	377,35	410,65	375,37	226,86	165,04	117,24	87,75	236,2
1975	107,74	147,09	201,76	280,08	326,31	357,35	396,86	363,73	236,33	179,35	114,59	83,55	232,9
1976	125,44	148,69	235,92	304,80	359,83	388,55	387,30	334,23	266,76	153,85	109,28	68,08	240,2
1977	107,74	132,68	215,83	291,31	292,80	350,15	327,57	320,62	250,53	184,45	109,28	71,72	221,2
1978	93,83	140,69	201,76	235,12	311,95	326,16	361,02	368,27	232,27	199,75	129,18	60,79	221,7
1979	97,62	140,69	191,71	275,58	335,89	393,35	394,47	320,62	256,61	165,75	113,26	66,26	229,3
1980	92,56	151,89	203,77	320,53	321,52	338,15	394,47	318,35	260,67	169,15	114,59	67,17	229,4
1981	106,47	159,90	193,72	280,08	266,46	398,15	353,85	291,12	222,13	145,35	133,15	57,15	217,3
1982	105,21	142,29	243,96	331,77	295,19	316,56	301,29	313,81	222,13	167,45	97,34	58,06	216,3
1983	101,42	118,28	191,71	235,12	288,01	338,15	272,62	245,74	246,47	186,15	100,00	74,45	199,8
1984	81,18	140,69	215,83	286,82	280,83	352,55	341,91	343,31	248,50	174,25	101,32	58,06	218,8
1985	101,42	137,49	205,78	275,58	314,34	342,95	351,46	350,12	242,41	203,15	103,97	68,08	224,7
1986	87,50	118,28	179,65	248,61	323,92	342,95	382,52	297,93	203,87	155,55	121,22	60,79	210,2
1987	105,21	132,68	199,75	259,85	355,04	328,56	351,46	334,23	230,24	148,75	107,95	66,26	218,3
1988	78,65	147,09	213,82	244,11	280,83	352,55	359,79	320,62	250,53	170,85	123,87	85,37	219,0
1989	124,18	169,50	231,90	248,61	377,05	396,55	396,78	343,31	299,21	192,95	93,36	62,62	244,7
1990	105,21	132,68	266,07	268,84	378,98	345,35	384,91	329,70	252,56	167,45	107,95	83,55	235,3
1991	119,12	143,89	203,77	293,56	380,91	362,15	342,83	334,23	250,53	181,05	102,65	67,17	231,8
1992	120,38	158,29	211,81	264,34	335,89	297,36	346,69	297,93	252,56	148,75	97,34	70,81	216,8
1993	107,74	183,91	233,91	264,34	292,80	330,95	404,49	354,14	236,33	172,55	118,56	53,51	229,4
1994	93,83	137,49	211,81	266,59	307,16	398,95	342,83	318,35	250,53	174,25	129,18	68,99	225,0
1995	92,56	151,89	213,82	345,26	339,98	403,75	349,00	366,59	242,41	192,95	107,95	69,81	239,7
1996	102,68	151,89	229,89	309,29	331,10	407,75	396,86	327,43	270,81	184,45	100,00	69,90	240,2
1997	103,94	140,69	288,18	320,53	331,10	354,95	387,30	309,27	268,79	181,05	94,69	60,79	236,8
1998	100,15	183,91	245,97	282,09	350,25	378,95	358,63	366,00	230,24	181,05	121,22	74,45	237,7
1999	102,11	174,42	229,57	283,07	330,71	390,95	378,28	347,56	247,82	177,70	123,87	61,62	237,3
2000	123,32	137,26	269,12	233,62	316,04	378,95	353,62	357,80	260,00	163,39	98,67	51,04	228,6
2001	81,71	184,13	173,82	298,81	350,02	406,15	341,29	339,50	289,75	180,39	139,79	81,88	238,9
2002	92,32	141,26	230,80	293,56	328,40	322,16	341,29	338,50	257,29	177,10	94,25	57,51	222,9
2003	103,33	141,83	204,93	277,08	381,68	338,95	385,22	340,97	268,11	174,91	111,05	64,85	232,7
2004	97,21	193,85	223,09	311,54	354,65	375,75	383,68	331,45	256,61	159,56	126,96	66,10	240,0



O cálculo da ETP realizouse, en consecuencia, a partir da fórmula de Turc (1961), na que interveñen un parámetro como a temperatura, que manifesta unha tendencia crecente nas últimas décadas, e outro como a radiación incidente, que manifesta na maioría dos observatorios unha tendencia oposta. Os resultados do cálculo para as diferentes series temporais analizadas confirman en todos os casos unha tendencia significativa ao seu incremento ao longo do período estudado. Este resultado indica que, cando menos coa fórmula de Turc (1961) a influencia da temperatura sobre os valores da demanda evapotranspirante en auga da atmosfera é superior que a da radiación incidente. O incremento desta demanda no período de 36 anos estudado é aproximadamente de 50 mm de auga.

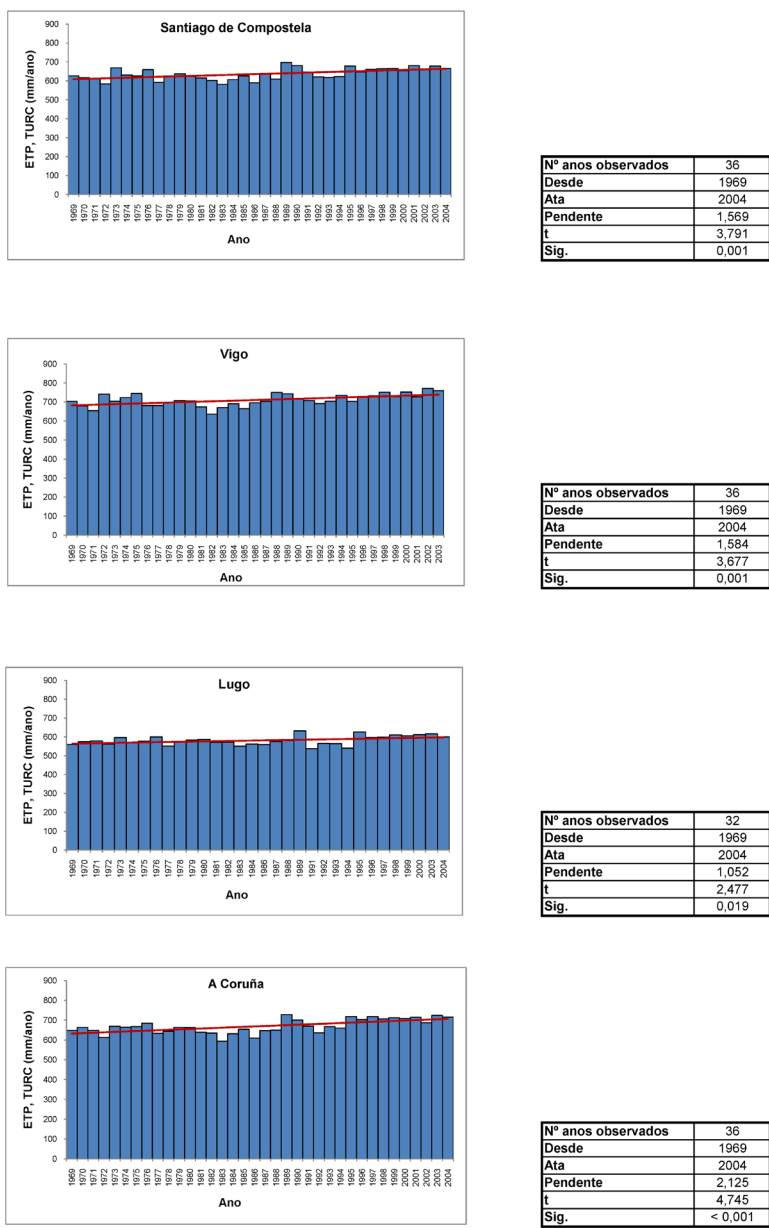


Figura 3. Valores da evapo-transpiración potencial (ETP) determinados pola fórmula de Turc (1961) para o período 1969-2004 nos observatorios da Coruña, Santiago de Compostela, Vigo e Lugo.

Balance hídrico

Neste caso realízanse dous tipos de balance: o sinxelo ou elemental, no que se relacionan só os datos a nivel mensual da oferta, como precipitación, e da demanda, como ETP, e o de Thornthwaite-Matter (1955) no que se ten en conta xa a ET real, é dicir, cando existe déficit de auga no solo. No primeiro caso teríamos un índice que nos definiría os valores dos excesos e déficits de auga a escala mensual e anual como indicadores das principais trazas da economía da auga, e no segundo, obteríamos uns valores dos que se poderían extraer conclusións perfectamente aplicables a situacións reais. O primeiro balance sería aplicable sobre todo á caracterización climática e o segundo caso a cuestións concretas, como as necesidades de rega, alimentación de acuíferos, xénese de caudais, etc.

Os valores dos déficits de auga anuais que se corresponden coa suma dos valores negativos dos meses en que a demanda en auga como ETP supera a oferta como precipitación non manifestan en todos os observatorios ningunha tendencia significativa. En cambio os excesos de auga anuais que se corresponden coa suma dos superávits de auga dos meses en que a oferta é superior á demanda ofrece un comportamento bastante variable dependente, sobre todo da variabilidade da chuvia invernal. E así, existe o caso da Coruña, sen tendencia ningunha; os de Vigo e Lugo, con tendencia negativa; e, finalmente, o de Santiago de Compostela, con tendencia positiva, que, por outro lado, é a única claramente significativa ($P < 0,01$). A interpretación destas diferenzas entre as chuvias invernales, que non corresponden a este capítulo, sería a explicación deste comportamento, un tanto caótico, dos excesos de auga do balance hídrico dos observatorios galegos analizados.

O cálculo do balance hídrico segundo o método de Thornthwaite-Matter (1955) realizouse só co observatorio de Santiago de Compostela, considerando unha reserva máxima en auga do solo de 100 mm e uns valores de escoamento directo do 5%. Os valores da ETR manifestan, igual que coa ETP, unha tendencia ao incremento tamén significativa, pero cuns valores que son aproximadamente 100 mm inferiores. Os valores da auga utilizable polas plantas do solo ao longo deste período manifestan unha certa variabilidade, pero sen ningunha tendencia significativa. Só no mes de xuño se aprecia unha tendencia á diminución dunha certa significación ($P < 0,1$) que podería estar relacionada coa seca de primavera que se detecta como a única tendencia significativa da precipitación mensual en Galicia.

Finalmente, os excesos e os déficits de auga anuais, calculados a partir dos valores de ETR determinados por este método, manifestan unhas tendencias moi semellantes ás determinadas a partir da ETP, e dicir, de incremento significativo no primeiro caso e sen tendencia no segundo.



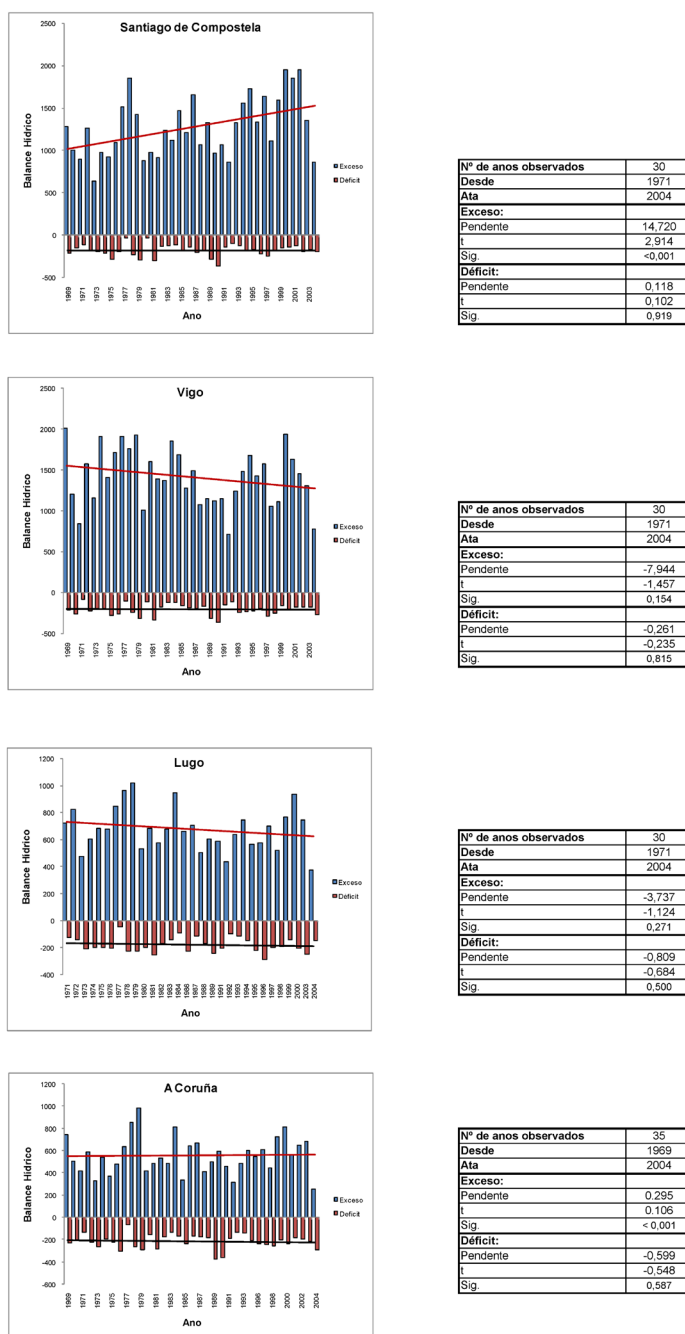


Figura 4. Valores dos excesos e dos déficits de auga correspondentes aos balances hídricos (P -ETP) dos observatorios de Santiago de Compostela, A Coruña, Vigo e Lugo. As tendencias dos excesos preséntanse en liña vermella, e as dos déficits, en liña negra. Os estatísticos correspondentes ás tendencias do exceso e do déficit aparecen nos recadros da dereita.

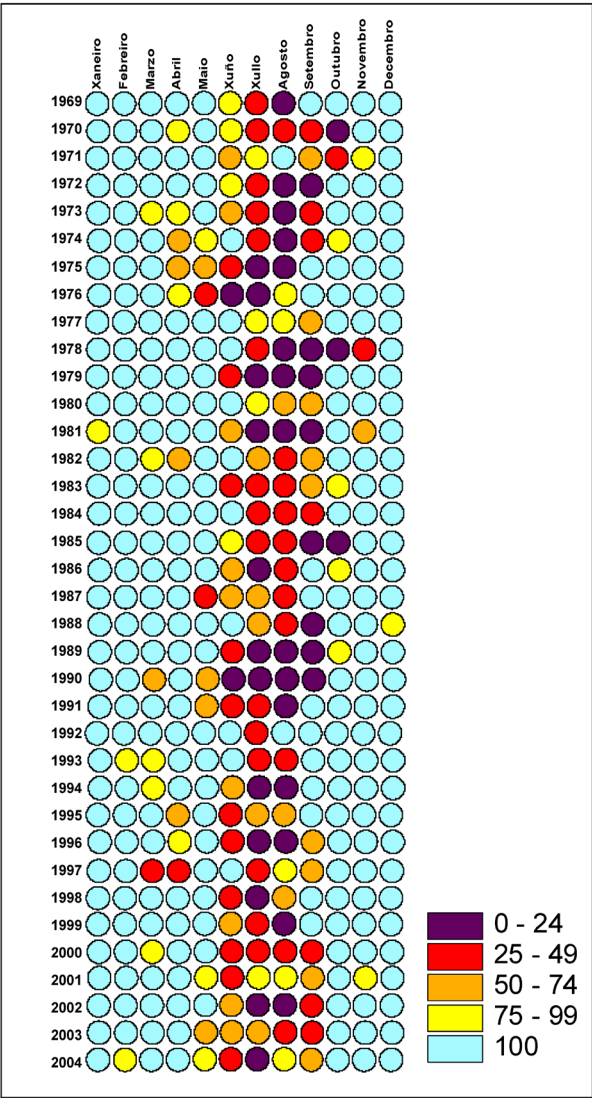


Figura 5. Evolución da reserva mensual de auga do solo utilizable polas plantas no período 1969-2004 en Santiago de Compostela calculada polo método de Thorthwaite-Matter (1955) (Reserva máxima en auga do solo = 100 mm. Escoamento directo = 5 %).

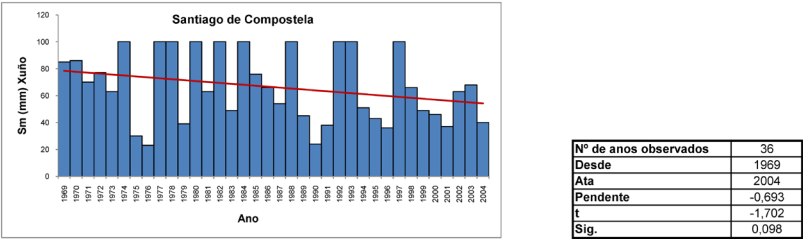


Figura 6. Evolución da reserva en auga do solo utilizable polas plantas, para o mes de xuño, en Santiago de Compostela no período 1969-2004 calculado polo método de Thornthwaite-Matter (1955).

CONCLUSIÓNS

A demanda evaporante en auga da atmosfera vén determinada por un factor termorradiativo e por outro aerodinámico, segundo recolle a clásica e recoñecida fórmula de Penman (1960). O termo aerodinámico dependente da velocidade do vento non puído ser avaliado pola irregularidade das medidas e a falta de información en moitos casos sobre as condicións de instalación dos anemómetros. Polo tanto, agardando que se poida realizar máis adiante un estudo pormenorizado deste parámetro que permita, cando menos, a reconstrución dalgunha serie histórica, neste estudo vai ser considerado soamente o factor termorradiativo. Por outra parte, segundo os estudos de Paz González e Díaz-Fierros, este factor é o máis importante dos dous, xa que determina, para as condicións de Santiago de Compostela, o 60-80% da demanda evaporante da atmosfera.

Os dous termos que interveñen no factor termorradiativo (temperatura e radiación incidente sobre a superficie da terra) poden ser considerados a partir da fórmula de Turc (1961), da que se demostrou o seu bo axuste ás condicións climáticas de Galicia (Díaz-Fierros, 1975). En relación coa temperatura, xa se puído demostrar en diferentes capítulos deste libro o carácter ascendente que manifesta na maioría dos observatorios galegos a partir da década dos setenta. A radiación incidente, en cambio, cando se determina a partir da fórmula de Armstrong, que toma como base as horas de sol, amosa un comportamento pouco definido, pero que en xeral tende a diminuír nas series históricas analizadas. Esta diminución atribuíble ao descenso das horas de sol por un incremento da nebulosidade atopouse en moitos outros puntos de Europa, polo que ten un certo carácter xeneralizable. A cuestión, malia que aberta aínda en moitos puntos, poderíase explicar pola influencia da contaminación por aerosois sobre a formación das nubes.

O resultado da interacción da temperatura e a radiación sobre a evapotranspiración potencial amosa unha maior importancia do primeiro factor, polo que o resultado final é o dun incremento da demanda evaporante da atmosfera ao longo dos últimos 33-36 anos que se pode estimar, como termo medio, da orde dos 50 mm.

O balance hídrico resultante da relación entre a oferta en auga pola precipitación e a demanda pola evapotranspiración potencial sinala o carácter determinante do primeiro factor, tanto polos valores absolutos como pola variabilidade interanual. Deste xeito, a indefinición que, en xeral, mostra a precipitación no relativo ás tendencias de evolución nas últimas décadas transmítese tamén ao balance hídrico, de tal maneira que as evolucións que poderían ser observadas no déficit e no exceso de auga terían que ser explicadas polo comportamento estacional da precipitación.

O cálculo da evapotranspiración real que xa ten en conta o factor limitante da auga do solo mostra igualmente o carácter determinante da precipitación sobre os diferentes termos do balance hídrico real, de tal xeito que de novo non aparecen tendencias definidas nas series históricas das últimas décadas. Unicamente no mes de xuño se aprecia unha tendencia á diminución, dunha certa significación, que podería estar relacionada coa seca de primavera que se detecta como a única tendencia significativa da precipitación mensual en Galicia.

BIBLIOGRAFÍA

- Cruz R., Lago A., Lage A., Rial M.E., Díaz-Fierros F. e Salsón S. (neste volume) Evolución recente do clima de Galicia. Tendencias observadas en variables meteorolóxicas.
- Dai A. *et al.* (2006). Recent trend in cloudiness over the United States: A tale of monitoring inadequacies. *Bulletin of the American Meteorology Society* **87**, 597-606.
- Datos de calidade do aire (2007). Consellería de Medio Ambiente
- Díaz-Fierros F. (1975). *Contribución a la Climatología Agrícola de Galicia*. Universidade de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela.
- Díaz-Fierros F. and Guitián F., (1971). Medidas de evaporación y evapotranspiración potencial en Santiago de Compostela (Galicia). *Anal. Edafol.* **XXX** (9-10), 993-1004.
- Fröhlich C. and Lean J. (2004). Solar daiative output and its variability. Evidence and mechanisms. *Astronm. Astrophys. Res.*, **12**, 273-320.
- Hobbins M. T., Ramírez J. A. and Brown, T. C. (2004). Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous U.S. Paradoxical or complementary? *Geophysical Research Letters*, **31** L13503, doi : 10/10029/2004 GL 019846.
- I.P.C.C. *Climate Change* (2007). *The Physical Science Basis*. Cambridge Univ. Press.
- Paz González A. and Díaz-Fierros F. (1978). Evaporación y evapotranspiración potencial en Santiago de Compostela durante el período 1969-1975. *Anal. Edafol.* **XXXVII** (3-4), 363- 374.
- Paz González A. and Díaz-Fierros F. (1988). Medida directa de la radiación y cálculo indirecto a partir de la insolación en *Avances sobre la Investigación en Bioclimatología* (Balvo de Pablos, ed.) Madrid pp 467-476
- Penman H. L. (1960). Weather, Plant and Soil, factors in Hydrology. *Weather*, **XVI**, 207-219.
- Quian Y. *et al.* (2006). More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China. *Geophysical Research Letters* **33** L01812, doi: 10. 1029 /2005 GL 024586.
- Smith M. (1990). *Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO Guideliness for prediction of crop water requirements*. FAO. Roma.
- Thornthwaite C. W. (1948). An approach toward a Rational Clasification of Climate. *Geogr. Rev. Ann.*, **XXXVIII**. New York.
- Thornthwaite C. W. and Matter J. R. (1955) *The Water Balance*. Drexel Inst. Technol. Lab. Climatol. New Jersey.
- Turc L. (1961). Evaluation des Besoins en eau d'irrigation. Evapotraspiration potentialle. *Ann. Agron.*, **12**, 13-49.
- Walter M. T. *et al.* (2004). Increasing evapotranspiration from the conterminous United States. *Journal of Hydrometeorology*, **5**, 405-408.
- Wild M. A., *et al.* (2004). On the consistency of trends in radiation and temperature records and implications for the global hydrological cycle. *Geophysical Research Letters*, **31** L 11201, doi: 10. 1029/2003 GL 019188.

