

TENDÊNCIAS EM SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO A DIFERENTES ESCALAS TEMPORAIS NA ILHA DA MADEIRA (1937/38 A 2016/17)

Luis Angel ESPINOSA^{1,2}, Maria Manuela PORTELA¹, Rui RODRIGUES²

1. IST/UL, CERIS, Portugal, maria.manuela.portela@tecnico.ulisboa.pt; luis.espinosa@tecnico.ulisboa.pt

2. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Portugal, rjrodrigues@lnec.pt

RESUMO

Apresentam-se alguns dos resultados de uma análise de tendências da precipitação na Ilha da Madeira efetuada tendo por base séries de precipitação a diferentes escalas temporais constituídas a partir das precipitações diárias no período de 80 anos entre 1937/38 e 2016/17 em 41 postos udométricos razoavelmente dispersos pela Ilha. Com exceção das precipitações diárias máximas anuais, os resultados indicam uma diminuição generalizada da precipitação. A zona montanhosa central, reconhecida como fundamental em termos de recarga dos aquíferos, é a que denota diminuição mais acentuada, circunstância que alerta para a vulnerabilidade da Ilha em termos de disponibilidade hídrica e para a necessidade de repensar a oferta de água na Ilha e os correspondentes sistemas de distribuição.

Palavras-Chave: Ilha da Madeira; precipitação; tendências; teste de Mann-Kendall; teste de declive de Sen

1. INTRODUÇÃO. ÁREA EM ESTUDO. DADOS DE BASE

Muitas atividades económicas, como sejam as relacionadas com a agricultura ou com a floresta, são planeadas e desenvolvidas e/ou têm retorno em função da variabilidade temporal da precipitação, pelo que entender os padrões históricos de tal variabilidade e analisar a sua estacionaridade são ações fundamentais para a boa prossecução daquelas atividades. Contudo, atualmente assiste-se a manifestações de alguns fenómenos hidrológicos que aparentam exceder (pela sua magnitude e/ou frequência) os limites da respetiva variabilidade histórica, previsivelmente em consequência das mudanças climáticas. Analisar tais manifestações face aos dados históricos não é uma tarefa trivial sendo que as conclusões que assim se extraíam dependem da fiabilidade dos modelos para o efeito utilizados. É neste contexto que a análise de tendências em séries de variáveis hidrológicas e a sua interpretação à luz dos efeitos esperados das mudanças climáticas têm merecido progressiva atenção. No caso de Portugal, os estudos sobre o assunto focados no território continental são numerosos e de longa data (Portela & Quintela, 1998), sendo contudo ainda escassos no que respeita às Regiões Autónomas. Acresce que as pequenas ilhas apresentam especificidades próprias (tais como áreas de bacia hidrográfica e capacidades das reservas de água superficiais e subterrâneas reduzidas) que as diferenciam das áreas continentais ou que podem aumentar a sua suscetibilidade aos efeitos das mudanças climáticas. No anterior contexto selecionou-se como caso de estudo o comportamento da precipitação na Ilha da Madeira, localizada no Atlântico Norte, a cerca de 600 km da costa oeste de África, com o objetivo de averiguar sobre a existência de tendências a diferentes escalas temporais que, de algum modo, possam indiciar efeitos atribuíveis às mudanças climáticas.

Não obstante a sua área reduzida (741 km² para um comprimento de cerca de 57 km e largura máxima de 22 km), a Ilha da Madeira apresenta um relevo muito acentuado que compreende um sistema montanhoso na direção este-oeste com cotas muito elevadas (Picos Ruivo e do Areeiro respetivamente às cotas 1862 e 1818 e a zona do Paúl da Serra a cotas superiores a 1400), a partir do qual se desenvolvem vales muito encaixados. A precipitação é fortemente influenciada pela topografia e pelos ventos dominantes, ocorrendo fundamentalmente nas encostas voltadas a norte e nas cotas altas (com valores da ordem de 2500 mm), sendo bastante mais escassa na vertente sul, designadamente, nas cotas baixas (com valores inferiores a 650 mm), onde se concentra a maior parte dos cerca de 268 000 habitantes da Ilha a que crescem sensivelmente 500 000 turistas por ano. Para além da variabilidade espacial, a precipitação apresenta ainda uma grande irregularidade temporal sendo bastante mais abundante nos meses de dezembro e de janeiro.

A água subterrânea é a principal origem de água doce, sendo captada por meio de galerias, túneis, poços e nascentes e por uma extensa rede de pequenos canais ou levadas, com mais de 1 000 km, cujas origens datam ao século XV, e que pelo seu carácter único deverão constituir património da humanidade. A recarga dos aquíferos ocorre

fundamentalmente nas zonas a maiores cotas (Prada *et al.*, 2005) onde os valores da precipitação e da permeabilidade do solo são mais elevados. Tais zonas são, desse modo, fundamentais para a segurança da Ilha em termos de disponibilidade hídrica.

DADOS DE BASE. MODELOS

A análise de tendências na precipitação na Ilha da Madeira utilizou como dados de base séries completas de precipitações diárias nos 41 postos udométricos esquematicamente localizados na **Figura 1** e identificados no **Quadro 1**. O período analisado compreendeu 80 anos hidrológicos, entre outubro de 1937 e setembro de 2017. As falhas diárias de precipitação foram preenchidas por imputação múltipla mediante recurso ao procedimento MICE (*multivariate imputation by chained equations*) (Espinosa *et al.*, 2019). A partir das séries completas de precipitações diárias obtiveram-se as seguintes amostras, quando necessário, mediante acumulação das precipitações diárias: precipitações mensais, trimestrais (sucessivos trimestres com início em outubro, janeiro, abril e julho, de T1 a T4), semestrais (de outubro a março, S1, e de abril a setembro, S2) e anuais e máximas anuais com durações entre 1 e 7 dias (AM1 a AM7). A análise de tendências incidiu sobre as anteriores amostras de modo a averiguar o efeito das mudanças climáticas também a escalas intra-anuais. Para tanto foi aplicado a cada amostra o teste não paramétrico de Mann Kendal (Mann, 1945) com avaliação da magnitude das tendências pelo estimador de declive de Sen (Sen, 1968). O nível de significância adotado foi de 5%.

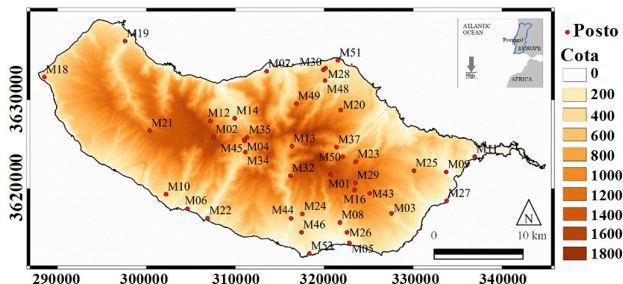


Fig. 1. Ilha da Madeira (740 km²). Localização esquemática dos postos udométricos (adaptada de Espinosa *et al.*, 2019).

Quadro 1. Postos udométricos utilizados. Precipitações anuais médias (adaptado de Espinosa *et al.*, 2019).

Posto udométrico		Coordenadas (WGS84)		Cota	Panual	Posto udométrico		Coordenadas (WGS84)		Cota	Panual
Código	Nome	Lat-N	Lon-W		(mm)	Código	Nome	Lat-N	Lon-W		(mm)
M01	Areiro	32.7200	-16.9170	1610	2592.2	M25	Santo da Serra	32.7260	-16.8170	660	1790.1
M02	Bica da Cana	32.7562	-17.0554	1560	2605.7	M26	Bom Sucesso	32.6620	-16.8960	291	719.6
M03	Canacha-Valparaíso	32.6763	-16.8421	675	1406.8	M27	Santa Catarina	32.6936	-16.7731	49	660.3
M04	Encumeada de São Vicente	32.7503	-17.0169	900	2410.5	M28	Cascalho	32.8290	-16.9250	430	1537.8
M05	Funchal Observatório	32.6476	-16.8924	58	608.4	M29	Poiso & Posto Florestal	32.7130	-16.8870	1360	2134.5
M06	Lugar de Baixo	32.6790	-17.0832	15	597.7	M30	Vale da Lapa	32.8270	-16.9280	346	1882.3
M07	Ponta Delgada	32.8213	-16.9920	123	1070.2	M32	Lapa Branca-Curral das F.	32.7190	-16.9650	610	1360.0
M08	Sanatório	32.6687	-16.9006	384	809.7	M34	Serra de Água	32.7420	-17.0200	573	1971.0
M09	Santana	32.7220	-16.7742	80	1338.9	M35	Chão dos Louros E.	32.7570	-17.0180	895	2509.7
M10	Canhas	32.6942	-17.1098	400	779.2	M37	Lombo Furão	32.7490	-16.9110	994	2416.2
M11	Cançal	32.7374	-16.7387	15	674.6	M43	Meia Serra	32.7020	-16.8700	115	2444.0
M12	Caramujo	32.7694	-17.0585	1214	2653.0	M44	Covão ETA	32.6750	-16.9630	510	930.3
M13	Curral das Freiras	32.7456	-16.9599	787	1754.7	M45	Encumeadas Casa EEM	32.7540	-17.0210	1010	2202.4
M14	Loural	32.7727	-17.0292	368	1600.6	M46	Santa Quitéria ETA	32.6610	-16.9510	320	726.5
M16	Montado do Pereiro	32.7019	-16.8839	1260	2080.4	M48	ETA São Jorge	32.8160	-16.9260	500	2093.7
M18	Ponta do Pargo	32.8108	-17.2589	339	817.8	M49	Fajã Penedo	32.7920	-16.9600	620	2378.8
M19	Porto do Moniz	32.8492	-17.1628	64	1234.2	M50	Cabeço do Meio-Nogueira	32.7357	-16.8987	995	2477.9
M20	Queimadas	32.7831	-16.9022	881	2207.3	M51	Ponta de São Jorge	32.8337	-16.9067	266	779.3
M21	Rabaçal	32.7585	-17.1311	1233	2005.3	M53	Lido-Cais do Carvão	32.6366	-16.9365	20	340.1
M22	Ribeira Brava	32.6740	-17.0630	25	703.1						
M23	Ribeiro Frio	32.7309	-16.8830	1167	2276.1						
M24	Santo António	32.6768	-16.9459	525	929.8						
						Média					
						Simples					
						Ponderada de acordo com o método de Thiessen					
						1573.4					
						1617.9					

RESULTADOS

Com exceção dos resultados relativos às precipitações máximas anuais com durações superiores ao dia, os demais resultados da análise de tendências estão sintetizados no **Quadro 2** através dos valores do estimador de declive de Sen. As células sombreadas e a negrito identificam os valores estatisticamente significativos. Os meses de outubro, dezembro, fevereiro, abril e maio não constam do quadro uma vez que nenhum posto revelou tendências estatisticamente significativas nesses meses. Os resultados referentes às precipitações máximas anuais com

durações superiores ao dia não foram incluídos dada a menor relevância dessas precipitações em termos da gênese de cheias. Menciona-se, apenas, que estão sempre em causa variações da precipitação muito pequenas e que, em oposição com o comportamento da precipitação diária máxima anual, são indiciativas de tendências negativas progressivamente mais extensivas do ponto de vista espacial, contudo com redução do número de postos em que tais tendências são estatisticamente significativas: para durações de 2 a 5 dias, 4 postos, dos quais apenas um indicativo de acréscimo da precipitação; para a duração de 6 dias apenas 3 postos e para a de 7 dias apenas 2 postos, sendo que para estas duas últimas durações as tendências são apenas negativas.

Quadro 2. Resultados da análise de tendências: valores do estimador de declive de Sen (mm/ano) no período de 80 anos (1937/38 a 2016/2017).

Códigº	Mês							Trimestre				Semestre		Ano	AM1	Códigº	Mês							Trimestre				Semestre		Ano	AM1
	Nov	Jan	Mar	Jun	Jul	Ago	Set	T1	T2	T3	T4	S1	S2				Nov	Jan	Mar	Jun	Jul	Ago	Set	T1	T2	T3	T4	S1	S2		
M01	-2.29	-2.14	-1.34	0.01	-0.06	-0.21	-0.44	-2.15	-5.64	-0.55	-0.74	-7.70	-1.35	-9.30	-0.50	M24	0.21	-0.48	-0.37	0.08	0.07	0.05	0.09	1.39	-1.32	0.19	0.28	-0.51	0.56	0.19	0.15
M02	-1.13	-1.81	-0.24	0.05	-0.02	-0.23	-0.26	-1.08	-3.18	-0.43	-0.52	-4.65	-0.84	-3.53	0.12	M25	-0.88	-0.73	-0.17	0.11	0.05	-0.15	-0.38	-0.78	-1.61	0.40	-0.71	-2.56	-0.48	-2.78	0.00
M03	-0.14	-0.89	-0.67	0.06	0.01	0.00	-0.09	1.14	-2.45	0.36	-0.05	-1.13	0.37	-0.59	0.36	M26	-0.10	-0.37	-0.30	0.02	0.02	-0.02	0.00	0.62	-0.84	0.07	-0.01	-0.60	0.15	-0.28	0.08
M04	-0.34	-1.98	-1.04	0.11	0.24	0.09	-0.07	0.98	-3.81	-0.33	0.25	-2.73	-0.05	-2.00	0.37	M27	-0.09	-0.24	-0.15	-0.02	-0.02	-0.06	-0.03	0.44	-0.48	0.16	-0.14	0.05	0.05	0.25	0.20
M05	-0.05	-0.28	-0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	-0.60	0.07	-0.02	-0.30	0.19	-0.12	0.18	M28	-0.63	-0.70	-0.03	0.20	0.10	-0.14	-0.15	-1.07	-0.73	0.56	-0.29	-1.80	0.32	-1.44	0.12
M06	0.13	-0.10	-0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	-0.38	0.19	-0.02	0.46	0.27	0.48	0.17	M29	-1.43	-1.82	-0.82	-0.07	-0.07	-0.25	-0.37	-1.55	-3.94	-0.51	-0.69	-5.11	-1.41	-5.88	-0.12
M07	-0.75	-0.47	-0.16	0.03	0.06	-0.13	-0.25	-0.78	-0.86	0.04	-0.39	-1.83	-0.26	-2.20	0.11	M30	-0.38	-0.70	-0.22	0.24	0.14	-0.14	-0.12	-0.41	-1.28	0.77	-0.18	-1.83	0.55	-1.59	0.17
M08	-0.08	-0.37	-0.24	0.04	0.04	0.00	0.01	0.42	-0.82	0.09	-0.01	-0.38	0.21	-0.26	0.14	M32	-0.47	-0.90	-0.49	0.05	0.01	-0.06	-0.06	0.35	-1.98	0.12	-0.09	-1.63	-0.09	-1.84	0.13
M09	-0.43	-0.50	-0.13	0.02	-0.04	-0.27	-0.44	-0.38	-0.35	-0.16	-0.86	-0.71	-0.85	-1.49	0.10	M34	-0.44	-1.14	-0.04	0.03	-0.03	-0.14	-0.09	1.08	-2.14	0.33	-0.21	-0.62	0.01	0.01	0.06
M10	0.23	-0.26	-0.45	0.04	0.06	0.00	0.04	0.86	-0.93	0.10	0.11	-0.05	0.16	0.33	0.07	M35	-1.22	-1.86	-0.37	0.10	-0.05	-0.18	-0.15	-0.31	-3.47	0.34	-0.33	-3.64	-0.23	-3.36	-0.01
M11	-0.24	-0.18	-0.08	0.04	0.02	-0.07	-0.09	0.07	-0.12	0.19	-0.15	-0.02	0.05	0.20	0.12	M37	-0.97	-1.23	-0.04	0.06	-0.03	-0.20	-0.31	1.24	-2.19	0.47	-0.49	-1.11	-0.28	-1.30	-0.05
M12	-1.20	-2.11	-1.04	0.24	0.22	-0.12	0.05	-0.77	-5.18	-0.39	0.00	-6.13	-0.64	-5.96	-0.37	M43	-0.88	-1.42	-0.86	0.25	0.22	-0.05	0.00	0.16	-3.99	0.20	0.08	-3.98	0.15	-3.77	0.07
M13	-0.30	-1.46	-1.03	0.04	0.00	0.00	0.08	1.10	-3.70	-0.64	0.10	-2.84	-0.66	-3.17	0.09	M44	0.00	-0.51	-0.33	0.00	-0.01	-0.05	0.01	0.97	-1.09	0.05	-0.01	-0.36	0.28	-0.07	0.38
M14	-0.78	-1.18	-0.36	0.13	0.11	0.00	-0.08	0.29	-2.31	0.03	-0.01	-2.59	-0.13	-2.71	-0.15	M45	-0.64	-1.40	-0.04	0.04	-0.06	-0.18	-0.15	0.95	-2.19	0.19	-0.31	-1.02	-0.08	-0.51	0.32
M16	-1.48	-1.85	-0.88	0.15	0.18	-0.02	-0.31	-1.87	-4.25	-0.04	-0.23	-5.94	-0.47	-5.92	-0.15	M46	-0.10	-0.31	-0.18	0.01	-0.01	-0.03	0.00	0.89	-0.62	0.19	-0.01	0.02	0.35	0.65	0.33
M18	-0.68	-0.91	-0.52	-0.06	0.00	0.00	-0.11	-1.78	-1.97	-0.60	-0.10	-3.78	-0.79	-4.25	-0.29	M48	-0.51	-0.59	0.11	0.19	0.03	-0.28	-0.55	0.00	-0.38	0.36	-0.75	-0.93	-0.28	-1.02	0.31
M19	-0.48	-0.27	0.00	0.12	0.15	0.03	0.03	-0.59	-0.38	0.51	0.01	-0.82	0.49	0.14	0.07	M49	-0.86	-1.30	-0.01	0.10	0.01	-0.30	-0.44	0.65	-1.99	0.27	-0.72	-1.07	-0.37	-1.46	0.30
M20	-0.87	-1.11	-0.06	0.38	0.19	-0.21	-0.12	-1.53	-1.48	1.35	-0.24	-3.33	1.11	-2.66	0.02	M50	-1.07	-1.22	-0.11	-0.02	-0.06	-0.25	-0.34	0.71	-2.27	0.17	-0.60	-1.68	-0.63	-1.36	0.14
M21	-0.04	-1.37	-0.72	0.25	0.03	0.16	-0.02	0.88	-2.61	0.28	0.42	-2.42	0.72	-2.00	-0.01	M51	-0.08	-0.10	-0.02	0.06	-0.02	-0.11	-0.18	0.33	0.10	0.12	-0.34	0.67	-0.07	0.55	0.16
M22	0.55	-0.09	-0.32	0.03	0.00	0.00	0.07	2.16	-0.20	0.34	0.10	1.66	0.56	2.35	0.34	M53	0.01	-0.09	-0.07	0.00	0.00	-0.02	0.02	0.57	-0.16	0.17	0.00	0.24	0.27	0.50	0.08
M23	-0.67	-1.08	-0.09	0.22	0.10	-0.14	-0.24	-0.21	-1.66	0.87	-0.32	-1.58	0.58	-1.17	0.02																

Em complemento dos resultados do **Quadro 1** procedeu-se à representação espacial dos declives de Sen conforme se exemplifica na **Figura 2**. O método de interpolação aplicado à obtenção das superfícies das anteriores figuras foi o IDW (*Inverse Distance Weighting*) com expoente 2. Embora a interpolação espacial relativa a cada escala temporal tenha utilizado os valores do declive de Sen nos 41 postos udométricos utilizados no estudo, na figura apenas estão localizados os postos com tendências estatisticamente significativas.

CONCLUSÕES

O estudo que se apresenta possibilita uma ampla caracterização do comportamento da precipitação na Ilha da Madeira julgando-se que representa uma contribuição relevante, pela quantidade de informação que utilizou, em termos de número de postos udométricos utilizados e da dimensão e das escalas temporais das séries de precipitação. Deste modo possibilita o equacionamento do planeamento e da gestão dos recursos hídricos mais conforme com a realidade.

Com exceção dos resultados relativos às precipitações diárias máximas anuais e, por vezes, de uma pequena zona da encosta sul, localizada nas proximidades do posto de Ribeira Brava, o estudo indicou uma diminuição generalizada da precipitação na Ilha da Madeira, não obstante estarem em causa tendências por regra sem significado estatístico.

A zona montanhosa central onde tem lugar a recarga dos aquíferos é a que denota tendências mais acentuadas, como seja o caso do posto M01-Areeiro, com 9.30 mm/ano. Este facto alerta para a vulnerabilidade da Ilha em termos de disponibilidade hídrica e para a necessidade de reequacionar os usos da água na Ilha, eventualmente no sentido de uma utilização mais parcimoniosa, e de proceder à avaliação dos sistemas físicos responsáveis pela distribuição de água.

No que concerne às precipitações intensas, o estudo ficou aquém do pretendido, tendo em conta a suscetibilidade da Ilha da Madeira aos fenómenos hidrológicos extremos, geradores de aluviões. Com efeito, devido à topografia da Ilha, as precipitações intensas relevantes para entender o comportamento das cheias na Ilha têm durações muito curtas sendo que não foi possível dispor de dados de precipitações compatíveis com uma análise espacialmente extensiva a uma qualquer escala sub diária.

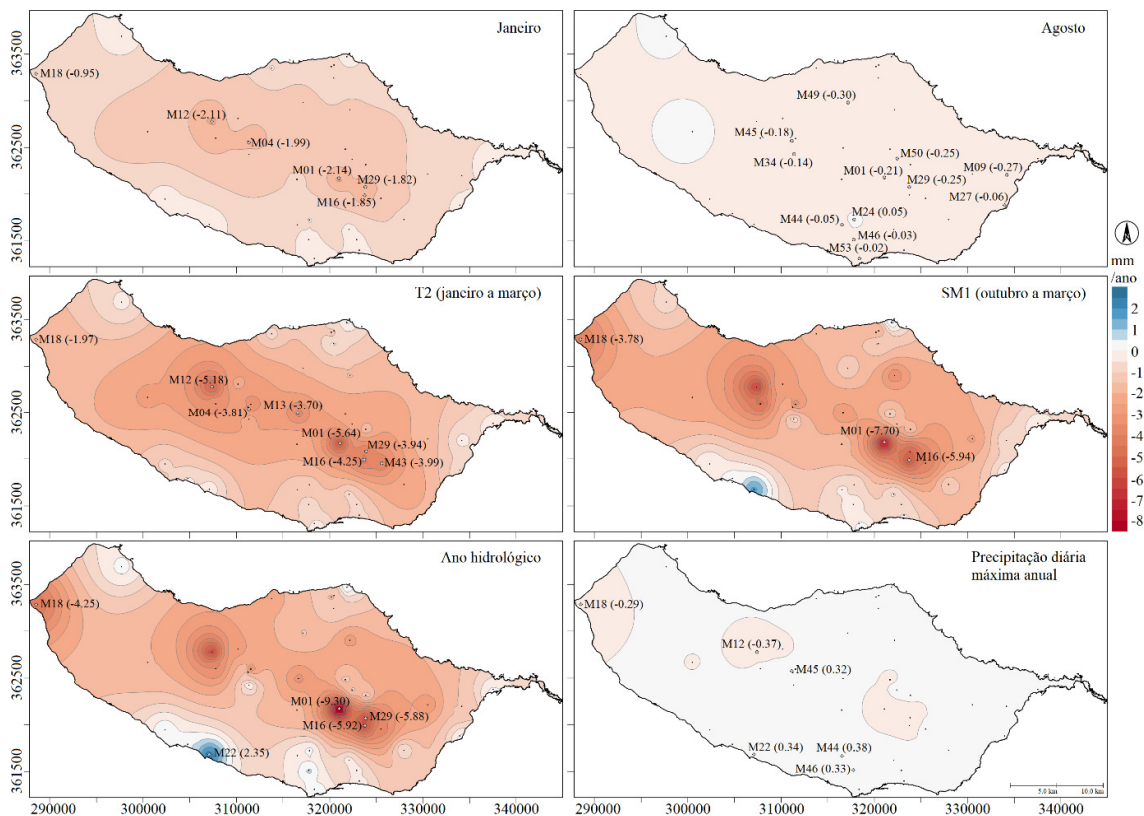


Fig. 2. Tendências das precipitações na Ilha da Madeira a diferentes escalas temporais (1937/38 a 2016/2017). Resultados do estimador de declive de Sen (adaptada de *Espinosa et al.*, 2019).

REFERÊNCIAS

- Espinosa, L.A., Portela, M.M., Rodrigues, R. (2019) Spatio-temporal variability of droughts over past 80 years in Madeira Island. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 25, 100623, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100623>.
- Mann, H. B (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245-259.
- Portela, M.M., Quintela, A.C. (1998) Índices de mudança climática em séries de precipitação em Portugal Continental, *Recursos Hídricos*, 19(2 e 3):41-74, ISSN 0870-1741, Lisboa.
- Prada, S., Da Silva, M., Cruz, J. (2005) Groundwater behaviour in Madeira, volcanic island (Portugal). *Hydrogeology Journal*, 13 (5-6), 800–812.
- Sen, P. K. (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J Am Stat Assoc*, 63 (324), 1379–1389.