

Traducción de Artículo



Les six règles de la régionalisation en hydrologie

Las seis reglas de la regionalización en hidrología

Alfonso Gutiérrez-López¹ *, Javier Aparicio Mijares², Clertine Guerrier³

*Autor de correspondencia

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recibido 19 Septiembre 2019

Publicado 31 Marzo 2020

Traducido 13 Agosto 2022

Publicado 19 Septiembre 2022

MOTS CLÉS

Régionalisation, transfert d'informations, régions homogènes, variabilité, conception des ouvrages

PALABRAS CLAVE

Regionalización, transferencia de información, regiones homogéneas, variabilidad, diseño obras

Résumé

L'un des principaux problèmes de la gestion de l'eau en Amérique latine et dans les Caraïbes est sans aucun doute le faible réseau de stations climatologiques et hydrométriques. L'estimation des événements de conception des travaux hydrauliques sera aussi bonne que la qualité des informations utilisées. La qualité de l'information est associée à des circonstances telles que le processus de recompilation des mesures, la longueur des enregistrements et la représentativité de l'information sur le site. En ce sens, l'hydrologue est confronté à deux problèmes complexes. Le premier est de disposer de bons outils pour effectuer une critique acceptable des données à utiliser, ce qui implique de définir des concepts très précis et de les suivre. Le second est la nécessité de concevoir des projets sur des lieux pour lesquels il n'existe que peu ou pas de données climatologiques ou d'enregistrements hydrométriques. Ce document présente le détail des concepts et les six règles à respecter lors de la réalisation d'une régionalisation hydrologique afin de transférer l'information hydrologique: (i) Caractériser la variabilité (spatio-temporelle) des mesures ; (ii) Identifier les variables qui décrivent le phénomène à estimer; (iii) Vérifier l'homogénéité et l'indépendance des séries temporelles; (iv) Identifier les régions hydrologiquement homogènes; (v) Construire des équations régionales pour le transfert d'informations; (vi) Vérifier la validité des équations régionales. Le but de ce travail est de s'assurer que les études de régionalisation hydrologique sont présentées de manière adéquate dans les pays où le transfert d'informations est d'une grande importance pour la conception des travaux hydrauliques.

Resumen

Uno de los principales problemas en la gestión del agua en Latinoamérica y el Caribe es sin duda la escasa red de estaciones climatológicas e hidrométricas. La estimación de los eventos de diseño de las obras hidráulicas será tan buena como tan buena sea la calidad de la información utilizada. La calidad de la información se encuentra asociada con circunstancias como el proceso de recolección de mediciones, la longitud de los registros y la representatividad de la información en el sitio; en este sentido, el hidrólogo se enfrenta a dos problemas complejos. El primero consiste en tener las herramientas adecuadas para llevar a cabo una crítica aceptable de los datos a utilizar, lo que conlleva a definir conceptos muy precisos y seguirlos. El segundo es la necesidad de diseñar proyectos en sitios donde los datos climatológicos o los registros hidrométricos son escasos o nulos. Este trabajo presenta el detalle de los conceptos y las seis reglas que deben respetarse cuando se realiza una regionalización hidrológica con el objeto de transferir información hidrológica: (i) Caracterizar la variabilidad (espacio-temporal) de las mediciones, (ii) Identificar las variables que describen el fenómeno a estimar, (iii) Verificar la homogeneidad e independencia de las series de tiempo, (iv) Identificar regiones hidrológicamente homogéneas, (v) Construir ecuaciones regionales de transferencia de información y (vi) Verificar la validez de las ecuaciones regionales. Con este trabajo se pretende que los estudios de regionalización hidrológica se presenten de manera adecuada en países donde la transferencia de información es de gran importancia para el diseño de obras hidráulicas.

1 Centro de Investigaciones del Agua, Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería. alfonso.gutierrez@uaq.mx

2 Comisión Nacional del Agua, México. Insurgentes Sur col. Copilco, Ciudad de México. francisco.aparicio@conagua.gob.mx

3 Aguas de Mérida C.A. Av. Gonzalo Picón, Mérida 5101, Mérida, Venezuela. clertineg@gmail.com

1. INTRODUCTION

L'hétérogénéité des régions représente un problème lorsqu'il s'agit d'étudier la distribution spatio-temporelle de tout phénomène climatique. De nombreuses méthodes et techniques ont été employées pour comprendre et expliquer les changements de diverses variables hydroclimatologiques. Dans tous les cas, on suppose qu'il existe une fonction mathématique qui représente la variabilité spatiale de la mesure effectuée dans un environnement ou au voisinage d'un point. Cette mesure peut avoir une variation spatiale et temporelle due au fait que certains processus physiques ont une certaine orientation prédominante. En d'autres termes, il s'agit de phénomènes à tendance anisotrope et stochastique (Haining, 2003). L'analyse spatiale des variables hydroclimatologiques est sans doute l'un des grands défis de l'hydrologie moderne. Non seulement l'analyse, mais aussi la représentation spatiale des variables climatiques est une activité difficile et très précise. C'est à partir de la densité des lieux de mesurage que l'on définit une structure spatiale et des modèles de comportement au sein d'un espace géographique bien sûr. Tout cela semble très bien dans l'hypothèse où des mesures de qualité sont disponibles (Chou, 2010; Gutierrez-Lopez et al, 2019). On reconnaît actuellement l'existence d'un cercle pervers dans les pays de la région d'Amérique Latine et Caraïbes (LAC). Dans la plupart de ces pays, le risque d'être touché par des événements extrêmes multirisques augmente d'année en année, mais l'intérêt pour le mesurer diminue. Il en résulte des réseaux de surveillance et des bases de données de plus en plus rares. Alors qu'il a été démontré que l'analyse spatiale des variables hydrologiques permet d'améliorer la connaissance des facteurs qui contribuent à réduire les risques des phénomènes extrêmes (Carrera-Hernández et Gaskin, 2007; Jacobi et al., 2013; Welz et Krellenberg, 2016). En d'autres termes, l'estimation du risque et de la vulnérabilité nécessitent la connaissance de processus de plus en plus complexes et des analyses probabilistes plus détaillées sont nécessaires pour faire face à l'occurrence d'événements extrêmes de plus en plus graves dans le temps et l'espace (Gutiérrez-López, et al., 2015).

En Amérique latine, les stations climatologiques sont généralement plus abondantes que les stations hydrométriques. Par conséquent, le concept de régionalisation hydrologique acquiert une valeur particulièrement importante dans une étude des

exploitations hydrauliques (Rasmussen et al., 1994; Loukas, 2002). Traditionnellement, les modèles pluie-ruisellement sont utilisés pour calculer les événements de conception, mais avec des bases de données limitées, l'incertitude des résultats augmente. Si l'on recourt à la vieille mauvaise pratique consistant à utiliser la similarité avec les bassins versants voisins ou à appliquer simplement des techniques d'interpolation spatiale sans au moins appliquer un test de discordance ou vérifier l'homogénéité hydrologique, les résultats seront discutables (Hosking & Wallis, 1997; Campos-Aranda, 2010; Campos-Aranda, 2017). Les erreurs qui peuvent être générées lors du transfert d'informations entre des régions non homogènes pourraient, en magnitude, être de l'ordre d'un événement isolé ou même de la valeur annuelle d'un événement analysé. Normalement, on tente de réduire l'incertitude de ce transfert d'informations en divisant une région en sous-régions hydrologiquement homogènes. Dans ce sens, des techniques de régionalisation hydrologique ont été développées pour estimer des événements ponctuels dans des endroits où il n'y a pas de stations ou dans lesquels les informations sont limitées, rares ou inexistantes (Taffa, 1991). En raison de la robustesse des procédures régionales, elles constituent un excellent outil pour estimer les événements extrêmes dans les pays où les réseaux de mesurage ne sont pas encore bien développés (Koutsoyiannis et al, 1998; Ouarda et al, 2001). L'utilisation d'une procédure régionale sur un groupe de bassins versants hydrologiquement homogènes présente de nombreux avantages par rapport, par exemple, à une analyse de fréquence sur un seul lieu de mesurage. Cela a déjà été prouvé depuis quelques années (Beran et al., 1990; Smithers et Schulze, 2001). Ainsi, l'objectif principal de ce document est de proposer le concept de régionalisation hydrologique et ses composantes de base. L'objectif est de standardiser les définitions, les critères et les étapes à suivre afin de réaliser ce que Campos-Aranda (2017) définit comme les aspects opérationnels de l'analyse régionale.

2. DÉFINITION

Si on veut formuler une définition, on peut commencer par la proposition de Rosbjerg et Madsen (1996 p.116), qui propose textuellement que: "Le but de l'analyse régionale est de combiner les informations de tous les sites de la région afin

d'améliorer les estimations des événements de l'année T sur un site, sur la base des propriétés régionales des paramètres des sites analysés". Thiessen a rigoureusement initié le concept de variables régionales en proposant une pondération des valeurs dans un espace anisotrope. Cependant, l'hypothèse selon laquelle les polygones de Thiessen se comportent comme des régions hydrologiquement homogènes doit être vérifiée. Matheron a également contribué à la définition de variables régionales, basées sur la fonction mathématique de l'anisotropie, appelée variogramme. Compte tenu de ces considérations, la définition suivante peut être énoncée: la régionalisation hydrologique est un ensemble d'équations (modèle mathématique) qui permet, grâce à un transfert d'informations, d'estimer les événements hydrologiques dans des lieux dont les données sont rares ou nulles. Voici quelques exemples de ces modèles: Méthode de l'indice d'inondation, méthode des années saisonnières, méthode régionale Box-Cox, méthode régionale du moment La méthode du Gradex, méthode régionale TCEV. Sur la base de ces concepts, il est proposé que tout processus de régionalisation doit inclure les étapes suivantes: (i) Caractériser la variabilité (spatio-temporelle) des mesures; (ii) Identifier les variables qui décrivent le phénomène à estimer; (iii) Vérifier l'homogénéité et l'indépendance des séries temporelles; (iv) Identifier les régions hydrologiquement homogènes; (v) Construire des équations régionales de transfert d'information et (vi) Vérifier la validité des équations régionales.

En complément de la définition, il est important de mentionner les actions qui sont menées croyant que la régionalisation a lieu. Les principales sont mentionnées ci-dessous:

- La régionalisation hydrologique n'est pas: le calcul et le dessin d'iso-lignes d'une variable hydrologique ; cela s'appelle la cartographie.
- La régionalisation hydrologique n'est pas : l'utilisation de diverses caractéristiques physiographiques d'une région; cela s'appelle la pondération spatiale.
- La régionalisation hydrologique n'est pas : l'utilisation de distributions de probabilités sur plusieurs stations dans une région ; cela s'appelle l'analyse de fréquence multiple.
- La régionalisation hydrologique n'est pas : l'utilisation d'une méthode telle que l'inverse de la distance, le Kriging, les Splines, etc. ;

ceci est appelé interpolation spatiale (Goovaerts, 2000; Lloyd, 2005; Huthinson, 1998; Demyanov et al., 1998; Huang et al., 1998).

- La régionalisation hydrologique n'est pas: l'estimation des enveloppes d'événements hydrologiques; cela s'appelle l'analyse des extrêmes.

3. MÉTHODOLOGIE

Tout processus de régionalisation nécessite :

- i. *Caractériser la variabilité (spatio-temporelle) des mesures*

La procédure la plus appropriée pour réaliser cette activité est : la géostatistique et les fonctions d'anisotropie liées aux variogrammes directionnels. L'analyse spatio-temporelle des variables hydrologiques est nécessaire pour la modélisation hydrologique des événements extrêmes. Un grand nombre de procédures géostatistiques ont été proposées (Hevesi et al., 1992; Dubois et al., 1998; Goovaerts, 2000; Gutierrez-Lopez et al, 2019). La dépendance spatiale est une propriété inhérente à un groupe de mesurages dans un espace géographique. Cette propriété sera acquise par toute donnée mesurée dans cette surface. La manière dont elle est acquise dépend, par exemple, de la résolution spatiale ou de l'échelle d'échantillonnage et de la densité d'échantillonnage ; cela est valable aussi bien pour le cas d'un champ spatial que pour la mesure spatiale d'agrégation (pour le cas d'objets dans l'espace). La première étape de la quantification de cette structure spatiale au sein d'un ensemble de données (dépendance spatiale) consiste à définir pour chaque groupe de points ou grappes d'objets dans l'espace les relations qui existent entre eux (Chou, 1991; Haining, 2003).

- ii. *Identifiez les variables qui décrivent le phénomène à estimer.*

La procédure la plus appropriée pour réaliser cette activité est: une analyse en composantes principales ou une analyse factorielle des correspondances (analyse multivariée). En général, les caractéristiques liées au site telles que la température, la géologie, la surface du bassin versant, la topographie, la pente moyenne du chenal principal et même l'utilisation des terres combinées aux mesures de l'infiltration

contribuent comme des caractéristiques significatives d'un bassin versant (Douguédroit et De Saintignon, 1981; Pilgrim et al., 1982; Schauer et Jenkins, 1996; Dunn et Lilly, 2001; Naef et al., 2002). De même, les aspects géographiques tels que la latitude, la longitude ou la distance à l'océan déterminent fortement le régime de précipitations d'une région (Smithers et Schulze, 2001). Une autre variable importante est l'indice pluviométrique (précipitations maximales sur deux jours consécutifs et précipitations pour une période de retour de 5 ans), qui a été utilisé pour classer et regrouper les bassins ayant un comportement similaire (Acreman et Sinclair, 1986). Un aspect important est de considérer que les caractéristiques physiographiques ne garantissent pas toujours la similarité physiographique et la réponse hydrologique des bassins versants (Burn, 1997; Cunderlik & Burn, 2002). Cependant, les paramètres d'une distribution ou d'un modèle spécifique décrivant un processus hydrologique dans le bassin versant sont déterminants pour le transfert d'informations d'un site à l'autre. Il est également important de mentionner que les bassins versants homogènes peuvent ou non être contigus.

iii. Vérifier l'homogénéité et l'indépendance des séries temporelles.

Les procédures minimales pour mener à bien cette activité sont: un test de discordance et un test pour vérifier l'homogénéité des données. Avant de générer des groupes homogènes, il est nécessaire de vérifier la cohérence des variables à utiliser (Ebisemiju, 1979; Nathan et McMahon, 1990; Caratti et al., 2005; Campos-Aranda 2017). En général, il est recommandé d'effectuer toutes les analyses de données exploratoires (Tukey, 1977). Une analyse statistique simple est un bon début, par exemple des statistiques de base, une analyse de régression ou une analyse de variance (Ojeda-Ramírez et al., 2011). Des études récentes Chebana et al. (2017) proposent des analyses de données plus détaillées, comme une analyse de détection de rupture de série, des statistiques pour détecter un changement dans la moyenne et la variance des échantillons. Les tests recommandés tels que la stationnarité et l'homogénéité des données sont hautement souhaitables. Le plus recommandé est le calcul de la fonction de covariance, puis un test d'indépendance par le biais d'un corrélogramme.

iv. Identifier les régions hydrologiquement homogènes.

Les procédures minimales pour réaliser cette activité sont: l'indice métrique de Minkowski, l'analyse de regroupement et les techniques multivariées. La délimitation de régions hydrologiquement homogènes est l'étape la plus difficile d'un processus de régionalisation hydrologique (Smithers et Schulze, 2001). La désagrégation d'une grande région en sous-régions similaires permettra, par exemple, de réduire les erreurs qui sont générées lors du transfert des tempêtes ou des données hydrologiques en général d'un bassin versant à l'autre (Leviandier et al., 2000). Les techniques utilisées pour déterminer les régions homogènes comprennent l'analyse des résidus (Bhaskar et O'Connor, 1989; Hall et al., 2002), l'analyse des statistiques des séries chronologiques (Lu et Stedinger, 1992; Kachroo et al., 2000 ;) ou l'utilisation de techniques multivariées (Gingras et Adamowski, 1993). Quelle que soit la procédure utilisée, elle nécessite toujours une identification préalable des variables ou des caractéristiques significatives de la région étudiée (Berger et Entekhabi, 2001; Burn et Elnur, 2002). Dans cet aspect, chaque auteur propose les caractéristiques physiographiques, climatologiques et géographiques qui seront utilisées dans le processus de régionalisation. Un guide recommandé pour une telle sélection a été présenté par Acreman et Sinclair (1986), par Nathan et McMahon (1990), par le groupe GREHYS (1996a et 1996b) et par Kryzstofowicz (2001). Afin de former des groupes de séries ou de bassins versants hydrologiquement homogènes, trois considérations sont mentionnées dans la littérature.

La première concerne la sélection d'un indice de proximité. Un indice de proximité représente sous forme mathématique la similarité ou la dissimilarité entre deux configurations, c'est-à-dire entre deux données ou points. Son application en hydrologie consiste à obtenir de tels indices à partir de configurations spécifiques, constituées de caractéristiques hydrologiques mesurables et continues à un rapport d'échelle connu. $X_{i,j}$ est la j -ème caractéristique de la i -ème configuration. L'indice de proximité entre deux points (configuration) "i" et "k" est noté: $d(i,k)$. L'indice de proximité le plus courant est l'indice métrique de Minkowski, qui mesure la non-similarité (inégalité) et se définit comme suit:

$$d(i, k) = \left[\sum_{j=1}^{\delta} |X_{i,j} - X_{k,j}|^r \right]^{1/r} \text{ donde } r \geq 1$$

Les trois types les plus courants de l'indice métrique de Minkowski sont :

- a. La distance euclidienne ($r=2$). Cette distance a également la variante de la distance euclidienne au carré. Ces deux distances sont calculées à partir de données brutes et non de données standardisées (Gower et Legendre, 1986). Cette distance présente certains avantages, par exemple, la distance entre deux objets n'est pas affectée si un nouvel élément est introduit dans l'analyse. Toutefois, cette distance est affectée par la magnitude des unités de mesure. Pour corriger cela, on peut tenter une standardisation avant de calculer les distances (Jain et Dubes, 1987 ; Saporta, 1990).
- b. La distance de Manhattan ou du taxi ($r=1$). Cette distance est la différence moyenne entre les magnitudes des mesures. Dans la plupart des cas, cette distance donne des résultats similaires à la distance euclidienne. Cependant, il est important de noter qu'avec cette distance, les différences entre les mesures sont très importantes car la distance n'est pas élevée au carré (Jain et Dubes, 1987).
- c. La sup-distance ou distance de Tchebychev ($r \rightarrow \infty$). Cette distance est utilisée lorsqu'on considère deux objets "différents" parce que certaines de leurs magnitudes ont été mesurées sur une échelle différente (Jain et Dubes, 1987 ; Saporta, 1990). Comme mentionné ci-dessus, ce document utilise la distance euclidienne qui est l'indice métrique de Minkowski le plus courant et le plus accepté dans les travaux d'ingénierie (Smithers et Schulze, 2001).

La deuxième considération concerne la sélection d'une règle d'agrégation. Également connu sous le nom d'algorithme de regroupement. Dans le domaine de l'hydrologie, l'algorithme de clustering de Ward est recommandé (Smithers et Schulze, 2001). Cette règle d'agrégation consiste à utiliser une analyse de variance pour évaluer chacune des distances entre les

éléments. On tente de minimiser itérativement la somme des carrés entre les distances "hypothétiques" des paires qui peuvent être formées à chaque étape. En d'autres termes, l'objectif est d'obtenir à chaque étape un minimum local d'inertie inter-groupe et un maximum d'inertie inter-classe (Saporta, 1990). En général, cette procédure est très efficace même si les groupes qu'elle forme sont généralement très petits. Jain et Dubes (1987) présentent une revue des différentes mesures mathématiques associées au regroupement d'éléments similaires (indices de proximité) ; cependant, leur application dans le domaine de l'hydrologie n'est pas encore bien développée. Un autre algorithme de clustering est la procédure connue sous le nom de K-means. Afin de diviser une zone d'étude en sous-régions homogènes, il est nécessaire de considérer qu'elles auront un comportement similaire, de sorte que les données requises seront déduites avec une grande précision, puisque les équations de régression, normalement utilisées dans le transfert d'informations hydrologiques, sont basées sur les caractéristiques du bassin. L'étude des problèmes de régionalisation a retenu l'attention de nombreux chercheurs, mais aucune méthodologie générale n'a été développée pour identifier les régions pouvant être utilisées dans les analyses hydrologiques. La plupart du temps, on utilise la technique de localisation géographique, qui consiste simplement à tracer des rayons entre 70 et 80 km à chaque site (station) et à considérer les stations situées à l'intérieur de ces cercles comme des bassins versants homogènes. Cette idée vient du concept du "variogramme" utilisé en géohydrologie pour montrer la variabilité des mesures piézométriques par rapport à la distance qui les sépare. Cependant, les sous-régions doivent être divisées à l'aide d'autres méthodes pour tenir compte des similitudes hydrologiques ou des caractéristiques des bassins, qui n'ont pas toujours une signification géographique, comme les courbes d'Andrews ou le test d'homogénéité de Langbein (Gutiérrez-López et Ramírez, 2005).

La troisième considération concerne la représentation de l'agrégation. Il est très important de représenter les résultats du regroupement de régions homogènes. Il est normal d'utiliser diverses techniques graphiques

telles que les diagrammes en arbre ou le regroupement hiérarchique. Une bonne méthode de représentation doit tenir compte de la nature des distances. Par exemple, un diagramme hiérarchique (dendrogramme) permet de décrire explicitement la structure finale de la classification obtenue. Le diagramme représente des éléments similaires regroupés dans une branche et chaque branche est un niveau hiérarchique formant un groupe et ainsi de suite pour chaque branche (Mosley, 1981 ; Saporta, 1990). Une bonne représentation graphique des régions homogènes doit inclure les distances d'agrégation (Maharaj, 2000).

v. Construire des équations de transfert d'informations régionales. Corrélation multiple = processus de normalisation

La procédure la plus couramment utilisée pour construire des relations régionales est la corrélation multiple. Normalement, les événements étudiés, associés à différentes périodes de retour, sont corrélés aux caractéristiques physiographiques du bassin versant (Zolt et Burn, 1994 ; Varas et Lara, 1998). Il est même courant d'utiliser les résultats d'une analyse de fréquence, en associant les paramètres de la distribution ajustée aux caractéristiques physiographiques, climatiques ou environnementales

de la région (Wiltshire, 1985, 1986 ; Burn, 1989, 1997 ; Prabhata et al, 1995 ; Castellarin et al, 2001). Certains auteurs (Ilorme et Griffis, 2013) proposent un prétraitement des données, c'est-à-dire un test de normalité (Krzysztofowicz, 2001).

vi. Vérifier la validité des équations régionales.

La validation croisée reste la procédure la plus appropriée pour vérifier les résultats d'une analyse régionale.

4. CONCLUSIONS

Un processus de régionalisation permet de transférer des informations d'un site à l'autre en caractérisant le comportement entre des régions hydrologiquement homogènes. Ce type de procédure est normalement utilisé pour estimer les précipitations, le ruissellement et les principales composantes décrivant le processus pluie- ruissellement. Le mot régionalisation doit être considéré non seulement comme un processus de regroupement d'éléments similaires, mais aussi comme un processus impliquant l'analyse des relations régionales, des indices de proximité, des règles d'agrégation, des méthodes de classification et des tests pour vérifier la validité de ces régions homogènes.

REFERENCIAS

- Acreman, M.C. et Sinclair, C.D., (1986) Classification of drainage basins according to their physical characteristics. an application for flood frequency analysis in scotland, *Journal of Hydrology*, 84 365-380.
- Adamowski, K. (1989) A Monte Carlo comparasion of parametric and non-parametric estimation of flood frequencies. *Journal of Hydrology*, 108, 295-308.
- Adamowski, K., (2000) Regional analysis of annual maximum and partial duration flood data by nonparametric and L- moment methods, *Journal of Hydrology*, Vol. 229 (3-4) pp. 219-231.
- Beran, M. A. Brilly, M. Becker A. et Bonacci, O., (1990) Regionalization in Hydrology, *International Association of Hydrological Sciences*.
- Berger, K.P. et Entekhabi, D., (2001) Basin hydrologic response relations to distributed physiographic descriptors and climate, *Journal of Hydrology*, Vol. 247 (3-4) pp. 169-182.
- Bhaskar, N.R. et O'Connor, C.A. (1989) Comparasion of method of residuals and cluster analysis for flood regionalization. *ASCE J. Plan de ressources en eau. Gérer.* 115(6) 793-808.
- Burn, D.H., (1989) Delineation of groups for regional flood frequency analysis *Journal of Hydrology*, 104 345-361.
- Burn, D.H., (1997) Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures, *Journal of Hydrology*, Vol. 202 (1-4) pp. 212-230.
- Burn, D.H., et Elnur, M.A.H., (2002) Detection of hydrologic trends and variability, *Journal of Hydrology*, Vol. 255 (1- 4) pp. 107-122.

- Campos Aranda, D. (2017). Discussion 2. Modèles régionaux de ruissellement instantané maximum dans la république mexicaine. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 08(4), 173-179. doi: 10.24850/j-tyca-2017-04-d2r2
- Campos-Aranda, D. F. (2010). Vérification de l'homogénéité régionale à l'aide de trois tests statistiques. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(4), 157-165.
- Caratti, J. F., J. A. Nesser, et C. L. Maynard. 2005. Watershed Classification Using Canonical Correspondence Analysis and Clustering Techniques : a Cautionary Note 1. 59601.
- Carrera-Hernández, J., et Gaskin, S. (2007). Analyse spatio-temporelle des précipitations et des températures quotidiennes dans le Bassin du Mexique. *Journal of Hydrology*, 336(3-4), 231-249. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.12.021>
- Castellarin, A., Burn, D.H. et Brath, A., (2001) Assessing the effectiveness of hydrological similarity measures for flood frequency analysis, *Journal of Hydrology*, Vol. 241 (3-4) pp. 270-285.
- Chebana, F., M. A. B. Aissia, et T. B. M. J. Ouarda. Aissia, et T. B. M. J. Ouarda. 2017. Test de décalage multivarié pour les variables hydrologiques, examen, comparaison et application. *J. Hydrol.* 548:88-103. Disponible sur : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.033>
- Chou, Y. (2010). Résolution cartographique et autocorrélation spatiale. *Geographical Analysis*, 23(3), 228-246. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1538-4632.1991.tb00236.x>
- Douguédroit, A. et De Saintignon, M. (1981) Décroissance des températures mensuelles et annuelles avec l'altitude dans les Alpes du Sud et en Provence ; *Eaux et climat*, CNRS. pp.179-193.
- Dunn, S.M. et Lilly, A., (2001) Investigating the relationship between a soils classification and the spatial parameters of a conceptual catchment-scale hydrological model, *Journal of Hydrology*, Vol. 252 (1-4) pp. 157-173.
- Ebisemiju, F. S. 1979. Un critère objectif pour la sélection de bassins représentatifs. *Ressource en eau*. Res. 15:148-158.
- Gingras Denis et Adamowski, Kaz, (1993) Homogeneous region delimitation based on annual flood generation mechanisms *Hydrological Sciences Journal*, 38 103-121.
- GREHYS, Groupe de recherche en hydrologie statistique, (1996a) nter-comparison of regional flood frequency procedures for Canadian rivers, *Journal of Hydrology*, Vol. 186, (1-4) pp. 85-103.
- GREHYS, Groupe de recherche en hydrologie statistique, (1996b) Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis, *Journal of Hydrology*, Vol. 186, (1-4) pp. 63-84.
- Gutierrez-Lopez, A., (1994) Modelos de transferencia de información hidrológica División de Estudios de Posgrado, UNAM, Tesis de Maestría, México.
- Gutierrez-Lopez, A., (1996) Sélection des caractéristiques physiographiques significatives d'un bassin à des fins de régionalisation. XIVe Congrès national d'hydraulique, Association mexicaine d'hydraulique, Acapulco, Mexique.
- Gutierrez-Lopez, A., Fortanell Trejo M, Albuquerque Gonzalez N, Bravo Prado F. (2019). Analyse de la variabilité spatiale des précipitations dans la région métropolitaine de Querétaro à l'aide d'équations d'anisotropie. *Investigaciones Geográficas*. doi:10.14350/riig.59757.
- Gutierrez-Lopez, A., Lebel T., Ruíz I., Descroix L. et Duhne M. (2015). Prévision du risque hydrologique pour une utilisation durable de l'eau dans le nord du Mexique. Chapter 13. pp. 245-271 In Setegn, S., and Donoso, M. *Sustainability of Integrated Water Resources Management* Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-12194-9>
- Haining R. (2003). *Analyse des données spatiales, théorie et pratique*. Cambridge University Press, 432 p.

- Hall M. J., Minns A. W et Ashrafuzzaman A. K. M (2002) The application of data mining techniques for the regionalisation of hydrological variables. *Hydrology and Earth System Sciences* 6:685 - 694.
- Hayward, D., et Clarke, R. T., (1996) Relations entre les précipitations, l'altitude et la distance par rapport à la mer dans la péninsule de Freetown, Sierra Leone *Hydrological Sciences* 41(3)
- Heo, J.H., Boes, D.C. et Salas, J.D., (2001a) Regional flood frequency analysis based on a Weibull model : Part 1. Estimation and asymptotic variances, *Journal of Hydrology*, Vol. 242 (3-4) pp. 157-170.
- Heo, J.H., Salas, J.D. et Boes, D.C., (2001b) Regional flood frequency analysis based on a Weibull model : Part 2. Simulations and applications, *Journal of Hydrology*, Vol. 242 (3-4) pp. 171-182.
- Hosking, J. R. M. & Wallis, J. R. (1997). *Analyse des fréquences régionales. Une approche basée sur les L-moments* (224 pp.). Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press.
- Jacobi, P., Momm-Schult, S., & Bohn, N. (2013). Ação e reação : Intervenções urbanas e a atuação das instituições no pós-desastre em Blumenau (Brasil). *EURE Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales*, (Santiago), 39(116), 243-261. <http://dx.doi.org/10.4067/s0250-71612013000100010>
- Jain A.K. et Dubes R.C. (1987) *Algorithms for clustering data*. Prentice Hall,.
- Kachroo, R., Mikhandi, S. et Parrida, B. (2000) Flood frequency analysis of southern Africa : I . Délimitation de régions homogènes. *Sciences hydrologiques*. 45 (3) pp. 437-447.
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D. et Manetas, A., (1998) A comprehensive study of rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, Vol. 206 (1-2) pp. 118-135.
- Krzysztofowicz, R., (2001) The case for probabilistic forecasting in hydrology, *Journal of Hydrology*, Vol. 249 (1-4) pp. 2-9.
- Lebel, T. Taupin, J. D. et D'Amato, N., (1997) Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel. General rainfall conditions and climatology, *Journal of Hydrology*, Vol.s 188-189, (1-4) pp. 74-96.
- Leviandier, T., Lavabre, J. et Arnaud, P., (2000) Rainfall contrast enhancing clustering processes and flood analysis, *Journal of Hydrology*, Vol. 240 (1-2) pp. 62-79.
- Loukas, A., (2002) Flood frequency estimation by a derived distribution procedure, *Journal of Hydrology*, Vol. 255 (1-4) pp. 69-89.
- Lu, Li-Hsiung et Stedinger, Jerry R., (1992) Sampling variance of normalized GEV/PWM quantile estimators and a regional homogeneity test, *Journal of Hydrology*, 138, 223-245.
- Naef, F., Scherrer, S. et Weiler, M., (2002) A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change, *Journal of Hydrology*, Vol. 267 (1-2) pp. 74-79.
- Nathan R.J. et McMahon T.A. (1990) Identification of homogeneous regions for the purpose of regionalisation *Journal of Hydrology*, 121217-238.
- Ojeda-Ramírez, M. M., F. Velasco-Luna, C. Cruz-López, et P. Tapia-Blázquez. 2011. *Méthodologie statistique appliquée aux finances publiques*.
- Ouarda, Taha B.M.J., Girard, C., Cavadias, G.S. et Bobée, B., (2001) Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis, *Journal of Hydrology*, Vol. 254 (1-4) pp. 157-173.
- Prabhata, K. Swamee, Chandra Shekhar P. Ojha et Ali Abbas (1995) Mean Annual Flood Estimation *Journal of Water Resources Planning and Management* pp 403-407.
- Rasmussen P.F., B. Bobée et J. Bernier (1994) Une méthodologie générale de comparaison de modèles d'estimation régionale de crue. *Revue des Sciences de l'Eau* 7 (1) : 23-41
- Rosbjerg, D., & Madsen, H. (1996). Le rôle des informations régionales dans l'estimation des précipitations ponctuelles extrêmes. *Atmospheric Research*, 42(1-4), 113-122. doi : 10.1016/0169-8095(95)00057-7
- Saporta, G., (1990) *Probabilités, analyse des données et statistique* Editions Technip. 193 p.

- Schauer, B., et Jenkins, W. (1996) A survey of urban and agricultural watershed management practices. *Revue Land and Water*, pp 6-8.
- Smithers, J.C. et Schulze, R.E. (2001) A methodology for the estimation of short duration design storms in South Africa using a regional approach based on L-moments, *Journal of Hydrology*, Vol. 241 (1-2) pp. 42-52.
- Smithers, J.C. et Schulze, R.E. (2001) A methodology for the estimation of short duration design storms in South Africa using a regional approach based on L-moments, *Journal of Hydrology*, Vol. 241 (1-2) pp. 42-52.
- Taffa, Tulu, (1991) Simulation of streamflows for ungauged catchments, *Journal of Hydrology*, 129 3-17.
- Tapsoba, D., (1997) Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques Ouest Africains et de leur récent changement. Th. D., Université de Paris XI (Orsay).
- Tukey, J.W. 1977. *Analyse exploratoire des données*. Addison-Wesley
- Varas, E., et Lara, S. (1998) Regional methods for estimating flood frequency probability. *Revista Ingeniería del Agua*; Vol 5, num 3, pp 51-57.
- Welz, J., et Krellenberg, K. (2016). Vulnérabilité au changement climatique dans la région métropolitaine de Santiago du Chili : positions théoriques contre preuves empiriques. *EURE Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales*, (Santiago), 42(125), 251-272. <http://dx.doi.org/10.4067/s0250-71612016000100011>
- Wiltshire, S.E., (1985) Grouping basins for regional flood frequency analysis. *Hydrol. Sci. Journal* 30(1) 151-159.
- Wiltshire, S.E., (1986) Identification of homogeneous regions for flood frequency analysis, *Journal of Hydrology*, 84 287-302.
- Zolt, Zrinji et Burn Donald H., (1994) Flood frequency analysis for ungauged sites using a region of influence approach, *Journal of Hydrology*, 153 1-21.

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización.



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
CC BY-NC-SA 4.0 license