



La predictibilidad en la gestión de riesgos naturales: Un enfoque epistemológico

Rafael Cosano Carbonell¹

Recibido: 31 de enero del 2016 / Enviado a evaluar: 10 de mayo del 2016 / Aceptado: 16 de diciembre del 2016

Resumen. El presente trabajo intenta mostrar las dificultades que entraña el hecho de poder ofrecer una predicción adecuada y exacta para la toma de decisiones en el ámbito de la gestión de riesgos naturales. Desde el punto de vista geográfico, se intenta hacer una descripción del proceso, del medio físico y humano, y las predicciones se quedarán en el ámbito de lo estadístico. El poder entender cuándo, cómo y dónde puede ocurrir un cambio en ambientes dinámicos se constituye en el primer problema que deben acometer los expertos en riesgos y desastres. Los sistemas se mueven, interaccionan entre ellos, aparecen y desaparecen, pero están regidos por leyes naturales y físicas que debemos ser capaces de comprender y de implementar en cualquier trabajo geográfico que requiera de una aproximación real a los procesos de toma de decisiones que eviten en la medida de lo posible las pérdidas de vidas humanas y materiales.

Palabras clave: Sistema; riesgo; incertidumbre; aleatorio; determinista; atractor.

[en] Predictability in Natural Risk Management: An Epistemological Approach

Abstract. This paper tries to show the difficulties of being able to provide adequate and accurate prediction for decision-making in the field of natural hazard management. From the geographical point of view, we try to make a description of the process, of the physical and human environment, and predictions will remain in the realm of statistics. Being able to understand when, how and where can occur a change in dynamic environments becomes the first problem that the risk and disaster experts must undertake. The systems move, interact, appear and disappear, but they are governed by natural and physical laws that we must be able to understand and to implement in any geographical work that requires a real approach to the processes of decision-making to avoid as far as possible the losses of life and property.

Key words: System; hazard; uncertainty; aleatory; deterministic; entropy; attractor.

¹ E-mail: rafaelcosano111@hotmail.com

[fr] Prévisibilité dans la gestion des risques naturels: Une approche méthodologique

Résumé. Le présent travail essaie de montrer les difficultés qui entraîne le fait de pouvoir offrir une prédiction adéquate et exacte pour la prise de décisions dans le cadre de la gestion de risques naturels. Du point de vue géographique, nous essayons de faire une description du processus, de l'environnement physique et humain, et les prédictions restent dans le domaine des statistiques. Le fait de comprendre quand, comment et où peut avoir lieu un changement dans des environnements dynamiques devient le premier problème que les experts doivent aborder en risques et désastres. Les systèmes évoluent, interagissent entre eux, apparaissent et disparaissent, mais ils sont régis par des lois naturelles et physiques que nous devons être capables de comprendre et d'implémenter dans tout travail géographique qui ait besoin d'une approximation réelle aux processus de prise de décision qui éviteront dans la mesure du possible les pertes en vies humaines et les pertes matérielles.

Mots Clés: Système; risque; incertitude; aléatoire; déterministe; entropie; attracteur.

Cómo citar. Cosano Carbonell, R. (2017): La predictibilidad en la gestión de riesgos naturales: Un enfoque epistemológico. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 37(1), 87-105.

Sumario. 1. Introducción. 2. Estocástico *versus* determinístico. 2.1. El principio de incertidumbre, dinámica de convección y resonancias. 2.2. Azar, atractores y bifurcaciones. 3. Reflexiones finales. 4. Bibliografía.

1. Introducción

La geografía, con su tradición cosmográfica en la que la descripción formaba parte esencial del saber geográfico, ha ido evolucionando. A partir de su institucionalización a mediados del siglo XIX en gran parte de Europa, y ya como disciplina universitaria, se desarrolló sobre la base de una filosofía cosmográfica que había evolucionado para dar coherencia a las distintas actividades de las sociedades geográficas (Jensen, 1992). Una vez empezaron las primeras producciones científicas, sobre todo con aportaciones teóricas, se empezó a contribuir al desarrollo de un *corpus* geográfico especializado en el análisis espacial.

Aunque siempre se ha dicho que el geógrafo “es un aprendiz de muchos oficios, pero es maestro de ninguno”, lo cierto es que, tal como dice Ackerman (Jensen 1992, 6) “el enfoque fundamental de la geografía es la diferenciación de la distribución de los espacios sobre la superficie terrestre y el análisis de las relaciones espaciales dentro del mismo universo”. En este sentido, es interesante evidenciar la aportación filosófica de Schmithüsen, quien trata de sentar sus bases filosóficas como ciencia. Hace una categorización de cuatro puntos del razonamiento básico, presentado en parejas de conceptos:

- Total-general, con la comprensión holística, al fin de establecer afirmaciones generales. Es el razonamiento utilizado por los filósofos de la ciencia. Naturaleza general de los fenómenos existentes.

- Parcial-general, donde se estudian las partes como tales, con el fin de llegar a conclusiones generales, como en el caso de las leyes en física, leyes-generalizaciones acerca de fenómenos parciales.
- Parcial-especial, relacionado con la comprensión de los fenómenos individuales. Es el razonamiento idiográfico. Características especiales de fenómenos parciales individuales.
- Total-especial, que busca comprender las características particulares de las unidades complejas. Globalidad.

Para Schmithüsen (Jensen 2002, 8) “la peculiaridad metodológica de la geografía es que intenta comprender en su integración espacial las complejidades que se dan juntas en un determinado espacio de la Tierra”. Esta es su base, la que hace que sea una ciencia independiente de las demás.

A partir de la década de 1950, cuando se introduce lo cuantitativo en el estudio geográfico es cuando la relación de la geografía con ciencias como las matemáticas y la física cobra mayor importancia. En este sentido, Hägerstrand fue de los primeros geógrafos que, para sus investigaciones, se apoyó en herramientas estadísticas y matemáticas. Empezó a utilizar muestras casuales de una distribución de probabilidad conocida introduciendo modelos estocásticos basados en la teoría de probabilidad matemática, que incluye variables aleatorias. Se incorpora el concepto de predicción futura en geografía desde un punto de vista distinto al determinismo.

La geografía tiene una marcada tradición idiográfica, reforzada por su fuerte vinculación con otras ciencias idiográficas como la geología, la biología o la historia. En este sentido y como contraposición, la física se caracteriza por el uso del método hipotético-deductivo, la utilización de técnicas cuantitativas bien desarrolladas y la formulación de leyes. Es una ciencia nomotética, pero no se debe olvidar que la geografía tiene que ser capaz de ser idiográfica y nomotética a la vez, y que intentar crear una dicotomía es un error que se está produciendo en demasiadas ocasiones.

Según Prigogine (Escohotado 1999, 93) la alianza entre las humanidades y el saber físicomatemático, presupone que:

- Lo legal y reversible es una extrema rareza en la naturaleza.
- El caos como muerte térmica es propio del equilibrio, mientras que el desequilibrio funda básicamente coherencia.
- Transiciones de orden a caos son regla universal, siendo su resultado una auto-organización de la materia.
- La irreversibilidad convierte el azar molecular en información y complejidad, fundando objetos que tienen a su alcance muchos estados estables.

Sin llegar a los extremos que expone Newton (Escohotado 1999, 30) de reducir los fenómenos de la naturaleza a leyes matemáticas con el fin de encontrar exactitud en todos los postulados, sobre todo en la ley de gravitación universal donde intenta medir una fuerza invisible, es cierto que las matemáticas han sido utilizadas desde

antiguo para conferir un carácter concreto a elementos intrínsecamente abstractos y dar explicación a sucesos naturales difícilmente explicables, aunque se utilicen potentes aparatos teóricos. Un ejemplo fascinante es el de la proporción áurea, que mediante un cálculo relativamente simple basado en la serie de Fibonacci², es capaz de mostrar y demostrar cómo algunas estructuras de la naturaleza siguen este precepto matemático y patrones para su configuración basada en una evolución natural de millones de años.

La evolución de la ciencia Matemática ha seguido un camino paralelo al de otras ciencias. Los griegos clásicos solo pretendían entender los procesos, aun cuando incluyeran singularidades que escapaban a sus conocimientos, mientras que, a partir del renacimiento ya no se conformaban con entender, sino que, querían anticipar el futuro con sus aparatos matemáticos más los heredados de los griegos, sobre todo la geometría euclidiana. Los griegos basaban su cálculo en reducir un fenómeno a partes cada vez más simples hasta que éstas admitan ecuaciones de solución exacta o lineal. En su recomposición yace el problema, ya que, se aíslan tanto los fenómenos que no pueden volver a ser unidos. Hablamos de lo cuantitativo. Pero se deja de lado el aspecto cualitativo de los mecanismos que actúan en medios complejos y que *per se* arrojan ecuaciones no lineales en su comportamiento. Es un sistema donde la conducta del todo es distinta a la funcionamiento de sus partes individuales; aparece la no linealidad.

Las matemáticas consiguen dotarse de un cuerpo teórico, si bien es cierto que algunas teorías y leyes universales que han estado vigentes durante casi trescientos años han empezado a tambalearse. Un ejemplo es la ley de la gravitación universal de Newton, donde los cuerpos se atraen en razón directa de sus masas e inversa al cuadrado de sus distancias. Dicha ley ha quedado en entredicho como otras de la mecánica clásica, y han sido mejoradas o desbancadas por algunos preceptos de la mecánica cuántica. A veces poder demostrar una negación que pronostica un suceso es muy difícil, pero más lo es que una vez demostrado se pueda demostrar que la teoría es errónea. El hecho último debe ser el conseguir que teoría y observación se encuentren lo más cerca posible (Escohotado, 1999).

En lo que respecta a la mecánica cuántica, sobre la que más adelante se hablará más extensamente y que se afana por dar explicación a sucesos que la mecánica newtoniana no es capaz de explicar razonablemente, ésta ciertamente aún se pierde en explicaciones y teorías que se encuentran en el límite de lo microscópico y lo macroscópico. Nacida como teoría dirigida a la teorización sobre las micropartículas, gracias a la introducción de la función de onda por parte de Schrödinger, da una salida al dilema newtoniano de la descripción y la incertidumbre planteada por Heisenberg y plantea una clara ruptura entre el microcosmos y el macrocosmos. En este sentido, la

²En la serie de Fibonacci cada nuevo elemento constituye la suma de los dos anteriores 1,2,3,5,8,13,21,34,55. A partir de 144, cada número dividido por el siguiente mayor da como resultado 0,618. Estos números constituyen la proporción áurea.

tan perseguida teoría unificada de campos puede tener el aspecto de panacea a la solución definitiva de este dilema.

Es en este punto donde se produce una paradoja difícilmente explicable. Según la mecánica cuántica, el nivel micro está sujeto a lo estocástico y el nivel macro al determinismo newtoniano, aunque con las matizaciones introducidas por la relatividad; pero también es cierto que se puede dar lo contrario, es decir, que el nivel micro sea determinista y que los procesos estocásticos dominen el nivel macro. La paradoja surge cuando se introduce el hecho de que el nivel micro forma parte fundamental, indispensable e inherente del funcionamiento de todos los niveles superiores llegando al macrocosmos. ¿Cómo podemos ser capaces de intentar hacer una predicción del futuro de un sistema si cuando elegimos la escala idónea para poder estudiarlo, esta modificará su evolución, dado que las leyes naturales que las gobiernan pueden ser deterministas, probabilistas o una mezcla de ambas? O bien se puede decir que entre lo micro y lo macro no hay interacción, aunque la naturaleza lo facilita constantemente, o que todos los niveles forman parte del mismo universo.

El fondo de lo expuesto en este trabajo es la capacidad o incapacidad de poder predecir el futuro con total exactitud. Después de que varias generaciones de físicos y matemáticos trabajaran bajo la premisa de la indeterminación, ya a mediados de los años 50 se habla de impredecibilidad objetiva. El observador no puede saber y la naturaleza tampoco. La naturaleza lo sabrá actuando lo mismo que el observador lo sabrá observando, sobre todo debido al concepto de auto-organización dentro de los sistemas complejos, donde elementos aislados se reconducen a una conducta unitaria o coherente, sirviéndose de su propia inestabilidad para generar nuevas formas de orden (Escotado 1999, 86).

1.1. Objetivos, metodología e hipótesis de trabajo

En este trabajo se intenta encontrar un compromiso entre ambas visiones y, además, hacerlo desde el punto de vista del análisis de sistemas y la cibernética, que se ocupa del control de los mecanismos internos y externos y los procesos de comunicación dentro de los sistemas. Lo interesante es encontrar la interacción entre los diferentes componentes. Estos mecanismos organizativos siguen leyes naturales determinadas, que también pueden ser descritas matemáticamente. Es en este punto cuando se quiere introducir la necesidad que tenemos los geógrafos en particular y la geografía en general de utilizar las ciencias exactas y naturales como base en nuestras investigaciones, más concretamente la física con todo su contenido y aparato matemático.

En este sentido los principales objetivos de este trabajo son:

- Realizar un aporte epistemológico en referencia a la necesaria integración entre las ciencias naturales y las ciencias exactas.
- Introducir diferentes conceptos que no se utilizan normalmente en Geografía y que derivan de otras ciencias como la Física, la Biología o la Química.

- Plantear un cambio de punto de vista a la hora de analizar los distintos procesos y factores que intervienen en la Gestión de Riegos Naturales, desde un punto de vista integrador y procurando dejar entrever diversas soluciones a un mismo problema.
- Analizar las diferentes aportaciones de autores que nada tienen que ver con la Geografía, pero que en sus trabajos abren la puerta a muchas y diversas interpretaciones.
- Abrir nuevas líneas de investigación que estén relacionadas con el control de sistemas complejos caóticos y ahondar en su más que evidente interés a la hora de gestionar el riesgo colectivo.

La metodología seguida ha sido la revisión bibliográfica de textos relacionados con la geografía, la física, la química y la biología.

La hipótesis de trabajo será: Si conocemos con precisión las condiciones iniciales de un sistema, y seguimos su evolución posterior, podremos ser capaces de realizar unas predicciones mucho más ajustadas a la realidad, adaptándolas a la Gestión de Riesgos naturales.

2. Estocástico versus determinístico

El orden, desde antiguo, se vinculó a organización, norma, axioma. Poco a poco se fue desvinculando de esos significados, y, de un concepto simple y permanente, pasó a ser temporal y complejo. Es en ese momento cuando entra en escena un concepto no tenido en cuenta hasta ese momento: la incertidumbre. Partiendo de la lógica determinista, donde la causa está ligada inextricablemente al efecto y extrapolándolo a un sistema, nos ofrece la posibilidad de trasladar unas condiciones iniciales al comportamiento futuro del mismo, siendo por ello previsible y calculable.

2.1. El principio de incertidumbre, dinámica de convección y resonancias

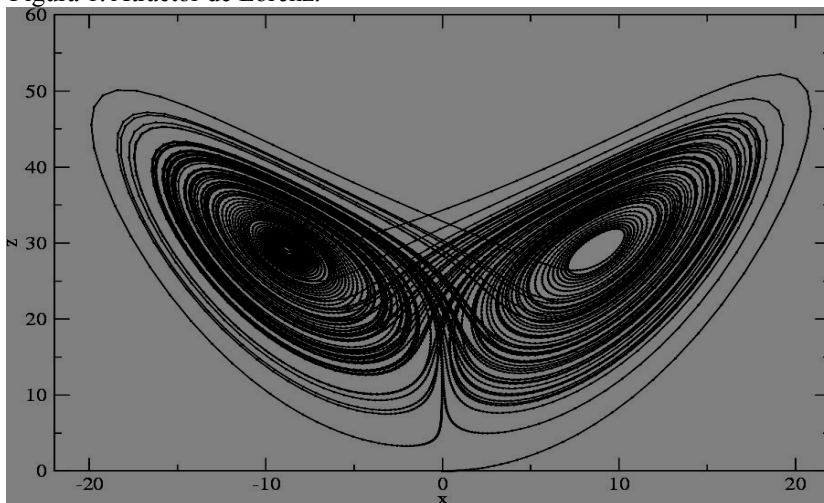
Intentando enmarcar lo anteriormente comentado, es necesario explicar el funcionamiento del principio de incertidumbre. Es una propiedad fundamental, ya que elimina el determinismo en las predicciones. La teoría de la mecánica cuántica se basa en el principio de incertidumbre, y fue capaz de introducir una nueva, a la vez que diferente idea, a la enunciada por Heisenberg en 1926, en virtud de la cual y partiendo de las premisas de la mecánica clásica “para predecir la posición y la velocidad futuras de una partícula, hay que ser capaz de medir con precisión su posición y velocidad actuales”. Pero siguiendo la hipótesis de Planck donde la imposibilidad de que la luz, los rayos X y otros tipos de ondas puedan ser emitidos en cantidades arbitrarias sino solo mediante cuantos, hace que cuando queramos medir la posición de una partícula solo podamos hacerlo con precisión cuando la velocidad de

la misma quede perturbada en una cantidad impredecible. En definitiva, cuanto con mayor precisión trate de medirse la posición de una partícula con menor exactitud podrá medirse su velocidad y viceversa (Hawking, 1988).

La mecánica cuántica introdujo la idea de que las partículas ya no poseen posiciones y velocidades definidas por separado, pasando a tener un estado cuántico o combinación de velocidad y posición. No predice un único resultado por observación sino que da un cierto número de resultados posibles y da las probabilidades de cada uno de ellos, introduciendo un elemento inevitable de incapacidad de predicción: la aleatoriedad (Hawking, 1988).

Lorenz, en su artículo *Deterministic non periodic flow*, (1963), comprimió la dinámica de convección en tres ecuaciones que no eran lineales ni integrables. Tras cientos de iteraciones, consiguió reproducir el primer atractor extraño. Esto nos dice que la dinámica convectiva es un caos estructurante, donde cierto movimiento de complejidad infinita se mantiene vuelto sobre sí, autocontenido y atraído por una forma. Jamás sale de sus límites, nunca sus líneas se intersectan y no alcanza un estado estable. Que nunca hubiera recurrencias de puntos o series de puntos, indicaba desorden absoluto, pero el hecho mismo de que faltase cualquier recurrencia indicaba una nueva forma de orden muy superior a la finura estructural. La dinámica convectiva muestra una sensibilidad extraordinaria a las condiciones iniciales.

Figura 1. Atractor de Lorenz.



Fuente: www.strgattractor.blogspot.com

Todo esto puede explicarse también desde el punto de vista de Poincaré que abrió el camino para tratar los problemas de estabilidad en los sistemas dinámicos complejos. En un universo estable donde pequeños cambios en las condiciones iniciales solo traen pequeñas alteraciones en el comportamiento del sistema

considerado y donde puede existir “el demonio de Laplace³”, que es capaz de predecir el futuro siempre que conozca el estado presente del universo con el suficiente grado de precisión, el problema simplemente no se presenta. Pero en un universo inestable esta predicción determinista es imposible: el universo en el que vivimos es inestable, irreversible y evolutivo asociado a la flecha del tiempo. Un sistema inestable es no integrable, como la mayoría de los existentes, debido a las resonancias en los grados de libertad del sistema, lo mismo que en música se suman las vibraciones de los instrumentos separados que generan armónicos fruto de la interacción de todos los instrumentos.

Las resonancias de Poincaré conducen a una forma de caos; causas pequeñas con efectos grandes. Encontramos una estrecha analogía entre no integrabilidad y caos determinista (Solé y Manrubia, 2001). La no integrabilidad tiene que ver con el azar, aunque Prigogine no lo comparte, ya que, las ecuaciones de sistemas caóticos son tan deterministas como las leyes de Newton, y sin embargo generan comportamientos aleatorios. En este sentido se puede aseverar que el determinismo se evidencia a escala macro y lo estocástico a escala micro.

2.2. Azar, atractores y bifurcaciones

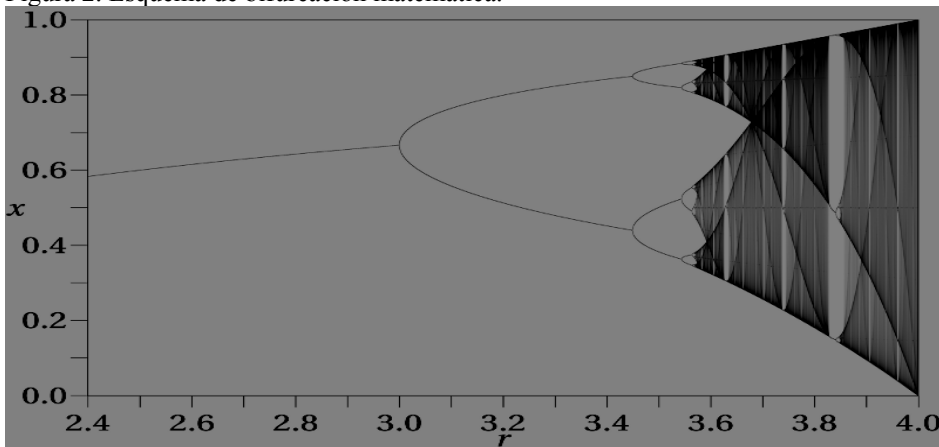
Para Prigogine (1991), el azar en física ha sido introducido por la mecánica cuántica, aunque en un principio solo a nivel micro, ya que se pensó que a nivel macro sería eliminado por la ley de los grandes números, aunque se ha visto que esto no es así. Lejos del equilibrio tenemos comportamientos no lineales, creándose nuevos estados de la materia a la vez que nuevos comportamientos. El azar puede ser eliminado cuando en un sistema dinámico aparecen los puntos atractores⁴ que hacen que el sistema sea continuamente atraído, eliminándose la aleatoriedad de su comportamiento. Un ejemplo puede ser la variabilidad climática en la que no influye el azar, ya que en la base de la enorme complejidad existente en las fluctuaciones de la temperatura, hay un determinismo complejo, que viene reflejado en el atractor (Smith, 2007), lo cual explica la inestabilidad del clima. Es entonces cuando la menor perturbación del exterior, o bien de fluctuaciones internas, crean grandes oscilaciones climáticas. Podemos hablar de Azar versus Atractor extraño, y de Estocástico/aleatorio versus Determinístico.

³ A veces, para expresar una idea, los físicos han imaginado un ser con capacidades sobrehumanas pero no sobrenaturales, es decir, capacidades superiores a las de cualquier persona, pero que no violan ninguna ley fundamental de la Naturaleza. A estos seres se les suele llamar *demonios*, a pesar de que no tienen ninguna mala intención. El primer demonio de renombre es el *demonio de Laplace*. El físico y matemático francés Laplace fue una de las principales figuras en el desarrollo de la mecánica creada por Newton. Estaba convencido de que todos, absolutamente todos los fenómenos de la naturaleza, incluido el comportamiento humano, obedecían las leyes de Newton y podían explicarse y predecirse a partir de ellas.

⁴ Zona o punto del espacio de fases al que tiende o sobre el que evoluciona un sistema. El más conocido es el atractor de Lorenz.

Siguiendo con las ideas de Prigogine (1999), y llegados a este punto, cuando se produce la bifurcación en el comportamiento de un sistema, su evolución se realiza a través de una sucesión de estados descritos por leyes deterministas y leyes probabilistas que a escala macro no se oponen, sino que se complementan. En los puntos de bifurcación a escala macro, se revela que la predicción del futuro es una mezcla de determinismo y probabilidad. En el punto de bifurcación la predicción es probabilista mientras que entre los puntos de bifurcación rigen leyes deterministas. Pero no debe olvidarse el tener en cuenta que la formulación de la dinámica para los sistemas caóticos, debe hacerse a nivel probabilístico con apoyo de la mecánica estadística y teniendo en cuenta el carácter histórico de la evolución del sistema, debido a la existencia de bifurcaciones (Smith, 2007).

Figura 2. Esquema de bifurcación matemática.



Fuente: www.eltamiz.com

Intentando entender lo anteriormente explicado, es necesario conocer cómo se mueven las partículas y moléculas a escala micro. Según Einstein (Ben Naim 2011, 36) las partículas en suspensión se mueven de forma aparentemente aleatoria, siguiendo el movimiento Browniano, es decir, si tenemos un número enorme de moléculas y átomos que se agitan aleatoriamente en un fluido, es de esperar que haya fluctuaciones. Si en el líquido se introducen partículas minúsculas, mayores que las moléculas del líquido, estas sufrirán un bombardeo molecular aleatorio. De vez en cuando se darán asimetrías en el bombardeo de moléculas de líquido sobre las partículas suspendidas y el resultado será un movimiento zigzagueante. Esto entronca directamente con la teoría de la incertidumbre de Heisenberg citada anteriormente, y con la teoría mecanico-estadística de Gibbs en la que un sistema de una enormidad de partículas, aunque en última instancia esté gobernado por las leyes del movimiento, se comportará de manera aleatoria y caótica y prevalecerán las leyes probabilistas.

Sin embargo, si a pesar de todas las cortapisas que encontramos en las diferentes teorías, podemos partir de una descripción exacta de todas las posiciones y velocidades de todas las partículas de un sistema, al poco tiempo éste perderá esta información. Debido a las colisiones aleatorias y a la rugosidad, la evolución del sistema se describirá más eficazmente mediante las leyes de la estadística que mediante las leyes de la mecánica. Cuando se suprima el elemento de azar, el sistema no evolucionará conforme a la segunda Ley de Termodinámica.

La estabilidad de un sistema no significa su estado estacionario y con ciclos regulares, sino la realización de una tendencia implícita en la organización de todos los sistemas físicos, que asocia una máxima complejidad con aquel punto en el cual ésta apenas puede aumentar. Todo esto nos aproxima a la termodinámica, ya que presenta la organización del sistema en una tendencia a una situación en la que la información tiene un límite definido por las fluctuaciones aleatorias locales, en un nivel que escapa a la selección (Jaque, Aguirre, 2002).

Si se pretende conceptualizar un proceso azaroso o aleatorio con la gestión de riesgos, se puede afirmar que todo fenómeno aleatorio es aquel que se resiste a ser descrito por un formalismo, que no permite ser reducido por un proceso algorítmico conocido; el azar entendido como concepto complementario del conocimiento. Cuando se habla de riesgo dentro de situaciones que se dan en los sistemas complejos, el azar no es ontológico sino epistemológico, o tratado desde la perspectiva del conocimiento (Cardona, 2010). La interacción entre los componentes en una escala puede llevar a un comportamiento global muy complejo en otra escala mayor. Esto nos lleva a un aumento de complejidad dentro del sistema, ya que la cantidad de información necesaria para describirlo cada vez es mayor.

Para poder empezar a modelizar el riesgo, es necesaria una conceptualización estructuralista y figurativa (Cardona, 2010), utilizando representaciones de la interacción entre los asentamientos humanos y su ambiente, cuya suma constituye sistemas complejos, pudiendo ser esta una aproximación útil para la gestión del riesgo y la prevención de desastres. Poder describir el comportamiento de un sistema y conocer todos sus estados es imposible en un sistema complejo, por lo que se tendrá que hacer uso de la teoría de la probabilidad o utilizar la mecánica estadística. En este punto volvemos a la dicotomía que nos persigue desde el principio, entre sistemas deterministas y aleatorios, pero siempre con la duda de si encontraremos leyes que regulen determinísticamente el proceso aparentemente aleatorio, o bien averiguar que estas leyes no existen y sí existe el azar ontológico, aunque también se puede hablar de un azar epistemológico que surge de las limitaciones del método científico (Martín Vide, 1989).

Tratando de hacer una primera recopilación de todo lo expuesto, se puede afirmar que desde el azar cuántico con repercusiones profundas en sistemas con alta sensibilidad a los errores en la mediciones de las condiciones iniciales, hasta los sistemas biológicos y climáticos, donde el número de factores que intervienen en su comportamiento es tan grande que es imposible considerarlos todos, se puede determinar que el azar en un componente ineludible del proceso de toma de datos, modelizado, predicción y prevención de desastres naturales.

Para poder entender el funcionamiento de un sistema, tenemos que conocer su composición. Normalmente consta de dos partes diferenciadas: la información esencial del sistema, que nos muestra la noción de su estado y su dinámica que constituye su regla de funcionamiento y su evolución en el tiempo. Como ya se ha comentado, la principal paradoja del caos se encuentra en su determinismo, generado por reglas fijas que no encierran en sí mismas ningún elemento de azar. Otro elemento importante en su descripción es su ubicuidad que demuestra que, cuando los fenómenos son caóticos, las predicciones a largo plazo son imposibles. El caos es demostrativo de que un sistema puede tener un comportamiento complicado que emerge en virtud de simples interacciones no lineales entre diferentes componentes (Wagensberg, 1986).

Es en este punto de complejidad cuando entran en juego los fractales⁵, que describen sistemas de dimensión fraccionaria, ya que en muchos sistemas de este tipo las diferentes piezas que los componen, y debidamente elegidas, se hacen semejantes a todo el conjunto cuando se las amplifica como es debido. Encontramos una estrecha integración entre fractalidad y caos: un atractor extraño tiene estructura fractal, que tiene una nueva simplicidad imbuída en una aparentemente más complicada (Mandelbrot, 1987), (Olcina, Ayala, 2002).

Si establecemos que el riesgo es un atractor con dimensión fractal⁶, (Cardona, 2010) se puede establecer que los escenarios de riesgo a diferentes escalas están vinculados, aunque no de manera simétrica y sincrónica, es decir que sus relaciones de una escala a otra pueden variar de manera no lineal. La dimensión fractal es una medida de la complejidad y la heterogeneidad que no corresponde a un número entero (Mandelbrot, 1987). Es decir, que podemos afirmar que alta dimensión + mínima perturbación = mayor desastre. Baja dimensión – máxima perturbación = menor desastre. Es por ello que en contextos donde la dimensión fractal del riesgo es alta, se requiere una mayor resolución de observación para apreciar la compleja variabilidad del riesgo a nivel local (Cardona, 2010).

Con todo lo anterior, volvemos al Segundo Principio de la termodinámica. Es esta una ley que describe la desorganización progresiva, desde el orden hacia el caos y la entropía aumenta hasta el equilibrio termodinámico con arreglo al progresivo desorden molecular (Ben-Naim, 2011).

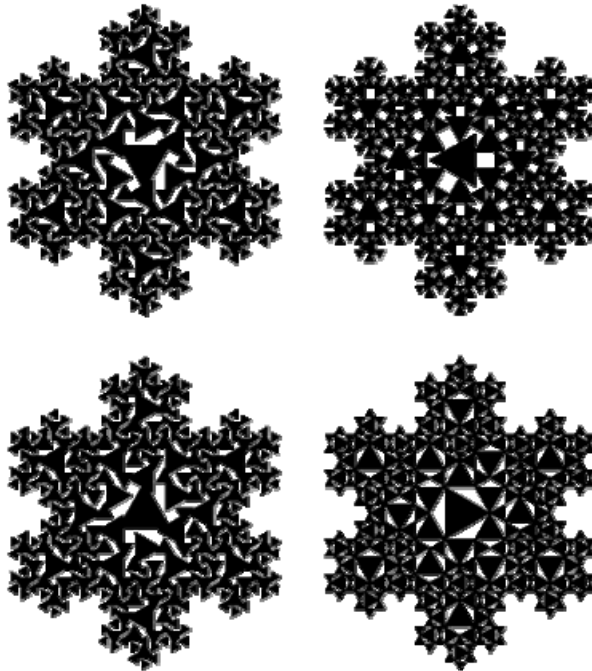
Según la teoría de las estructuras disipativas (Prigogine, Nicolis, 1997), la evolución de los sistemas abiertos es un movimiento del mismo fuera del equilibrio asociado con algunos procesos internos irreversibles, que incrementan la tasa de disipación por la producción de entropía. Es una inestabilidad disparada por condiciones de no equilibrio ambiental que conduce a una mayor disipación y

⁵ Objeto geométrico de dimensión fraccionaria, autosemejante y autocontenido cuya estructura se mantiene a diferentes escalas.

⁶ La dimensión fractal es un número real que generaliza el concepto de dimensión ordinaria para objetos geométricos que no admiten espacio tangente. Es un exponente que da cuenta de cuán completamente parece llenar un fractal el espacio a diferentes escalas.

producción de entropía que a su vez conduce a la aparición de nuevas inestabilidades. Lejos del equilibrio, con su proceso interno, el sistema aumenta la probabilidad de ser inestable con respecto a ciertas fluctuaciones.

Figura 3. Ejemplo de dimensión fractal. Copos de nieve de Koch.



Fuente. www.mathworld.wolfram.com/KochSnowflake

Para que el sistema disipe energía (Cardona, 2010), necesita una termodinámica del no equilibrio que parte del balance de entropía que, según Prigogine, viene dada por la suma algebraica de lo que produce más lo que se intercambia.

Es aquí cuando llegamos a un punto de inflexión sobre todo lo expuesto anteriormente. Se debe tener claro que los sistemas *disipativos*⁷ están constantemente tratando de transformarse, moviéndose de su estado actual de equilibrio hacia algún estado alternativo. A veces no reciben la energía del ambiente para sostener su transformación evolutiva, pudiendo permanecer en un estado latente sin evolución hacia adelante. No sabremos cómo acabará evolucionando, pero sí que serán susceptibles de poder ser modelizados, y que su predicción y comportamiento futuros seguirán un camino mucho más fácil de seguir. Sabremos cómo se encuentra en un

⁷Estructuras que disipan energía. Los sistemas pueden ser conservativos o disipativos.

momento determinado y esto nos facilitará el trabajo. Pero la mayoría de las veces recibirá un repentino incremento de energía que, sumado a su estado alejado del equilibrio, llevará a su desestabilización. Una perturbación puede forzar al sistema a abandonar su estado previo de referencia yendo hacia una nueva configuración. Prigogine (1996) nos dice “que la racionalidad ya no puede seguir siendo identificada con certeza, ni la probabilidad con ignorancia”.

Cuando los sistemas se alejan mucho del equilibrio, la situación deja de describirse como una prolongación lógica de dicho estado; éstos dejan el régimen lineal de la termodinámica para entrar en el no lineal, donde aparecen inestabilidades y discontinuidades. El estado estacionario compatible con las condiciones que impone el ambiente ya no es único y las fluctuaciones espontáneas pueden amplificarse y arrastrar a los sistemas hacia nuevos e inesperados estados estables. Es en este punto donde nos encontramos con la extraña reconciliación entre azar y determinismo. Cuando describimos un sistema con bifurcaciones entramos en la coexistencia de ambos coetáneamente. Entre dos bifurcaciones reinan las leyes deterministas, pero en la inmediata vecindad de tales puntos críticos reina el azar. Esta extraña colaboración se propone desde la termodinámica moderna: es la esencia del cambio. Este proceso evolucionario empieza desde el comportamiento *bifurcacional*⁸, siendo éste una forma fluctuante que da al sistema un movimiento oscilatorio entre dos o más puntos de equilibrio posible. Estas oscilaciones cíclicas indican que el sistema disipativo en cuestión se ha desestabilizado y entrado en fase caótica. Es en este punto donde pueden darse dos soluciones: o bien se mantiene caótico, oscila siempre más rápidamente y eventualmente se destruye él mismo, o bien la fluctuación se amortigua tanto como el sistema se asienta en una nueva configuración. Todo esto nos indica la complejidad de modelización de la mayoría de sistemas. Cuando esto ocurre, éste ya se ha desarrollado y se ha reorganizado alrededor de un nuevo punto de referencia en el cual inicia una nueva forma de detección de frontera. Ésta continúa hasta que una nueva perturbación o fuerza ocurre y una diferente configuración de condiciones externas e internas, de nuevo, empujan el sistema a una nueva trayectoria evolucionaria. Todo esto se da debido a que los sistemas disipativos son entidades estructuralmente caóticas y que se encuentran lejos del equilibrio, exhibiendo también una marcada dependencia sensible a las condiciones iniciales.

La aparente estabilidad en los sistemas dinámicos no lineales y abiertos se debe al hecho de que tienden a desarrollarse en estados cuasi-estables, ordenados en forma auto-organizada en el borde del caos y con un atractor fractal. En los sistemas de asentamientos humanos los desastres no son más que sucesos sociales de diferentes magnitudes y gobernados por una ley potencial, al igual que en el entorno natural lo están los sucesos físicos asociados. Este sistema tiene una configuración cuasi-estable que no corresponde simplemente a una situación de equilibrio dinámico, sino a un orden auto-organizado o auto-estructurado, resultado de múltiples perturbaciones

⁸Cambio brusco de carácter cualitativo o topológico en el comportamiento de un sistema.

internas y externas como los desastres. Las condiciones de vulnerabilidad -físicas, económicas, sociales, políticas- (Cardona, 2010), caracterizan su inestabilidad que favorece la ocurrencia de crisis. Esta susceptibilidad del sistema complejo no lineal representa su condición de estado crítico o de estar en el borde del caos.

En la dinámica no lineal, caos implica propiedades específicas de turbulencia en un sistema no lineal. El comportamiento caótico es globalmente estable y localmente inestable, Es aquí cuando volvemos al azar epistemológico como el derivado de leyes insuficientes y observaciones limitadas (Martín Vide, 1989). El azar es un concepto de conocimiento que admite medida y control y que además incluye términos nuevos como la fluctuación, el ruido, el error, la mutación, las perturbaciones, divergencias, resonancias⁹ ..., tratando de describir la esencia del cambio en la complejidad del mundo. Los sistemas que son estables son los que se hacen más viables y eso les hace ser más “resistentes al azar”, aunque, si se hacen demasiado ignorantes a su entorno, se debilitan y pueden desaparecer, por lo que deben aumentar su complejidad, evolucionar, adaptarse y superarse.

La diferencia entre orden y caos depende de la limitación de la capacidad en la medida del mundo. Un número creciente de sistemas tiene un comportamiento estocástico provocado por un solo atractor caótico. El comportamiento cualitativo de un sistema cambia cuando la intensidad de determinada influencia perturbadora pasa de cierto nivel crítico. Equilibrio inestable y dependencia sensible tienen mucho en común, ya que ambas suponen la amplificación de diferencias inicialmente pequeñas.

Cuando volvemos al punto de vista de la gestión del riesgo, el ambiente y la ocupación humana del territorio, se entienden como sistemas dinámicos complejos cuyos elementos se hayan en permanente interacción o como una red de relaciones activas entre dichos elementos que determina la existencia de los mismos y de la totalidad de los sistemas. Cuando se producen cambios en la dinámica que no son posibles de absorber o disipar por falta de flexibilidad o capacidad de adaptación, surge la crisis (Cardona 2010, 120). Esta crisis es, en realidad, una bifurcación en la trayectoria del sistema, y puede presentarse como consecuencia de una reacción en

⁹ Las variables que caracterizan a un sistema dinámico clásico son las coordenadas y las velocidades correspondientes. Con la ayuda de las velocidades y las coordenadas podemos expresar la energía del sistema, que por lo normal es energía cinética más energía potencial. Si queremos expresarlo en términos hamiltonianos, pasamos de velocidades a cantidades de movimiento o momentos. Esta energía es por definición la hamiltoniana. Con este tipo de descripción se consigue que las ecuaciones de movimiento adquieran una forma muy simple y que su integración sea inmediata. Pero una vez que la hamiltoniana empieza a moverse entre frecuencias definidas por diferentes grados de libertad, empiezan a aparecer interacciones dentro del sistema que se convierten en resonancias entre las frecuencias del sistema dinámico. Son relaciones lineales entre unas frecuencias que entran en el cálculo de las perturbaciones y llevan a infinitos o divergencias. Poincaré determinó la imposibilidad de eliminar las interacciones en los sistemas no integrables. Estableció que estas resonancias son un problema fundamental de la mecánica clásica. Pero es posible eliminar las divergencias y convertirlas en convergencias y con ello obtener una solución a las ecuaciones de la dinámica que acabará resolviendo el problema de la irreversibilidad estrechamente relacionada con la integrabilidad. Las divergencias acaban marcando la barrera entre sistemas dinámicos reversibles y sistemas disipativos de simetría temporal rota. Si se consiguen eliminar las divergencias de Poincaré, se da un paso esencial en la resolución de la paradoja del tiempo. (Prigogine, I, 1999)

cadena de influencias externas y acaba configurando el desastre que siempre conlleva un impacto ambiental desfavorable. Las crisis pueden presentarse como consecuencia de sucesos externos al sistema o como resultado de tensiones no resueltas en el interior del mismo. Se acaba llegando al desastre cuando se dan reacciones en cadena que en forma de bucles positivos incrementan las fuerzas disociativas hasta el punto de volverlas tendencias predominantes (Cardona 2010, 120) que enfrentan al sistema con alternativas destructivas como la pérdida de alguna de sus partes o elementos, la escisión del conjunto, la agregación forzada a un sistema mayor, la mutación de sus valores fundamentales o incluso su desaparición.

La evolución en el tiempo de los sistemas dinámicos complejos, por lo normal, contiene retroalimentaciones positivas y comportamientos no lineales, e incluso discontinuidades, que hacen que sea muy difícil predecirlos, aunque en retrospectiva sea fácil explicarlos, ya que un sistema puede saltar de un atractor a otro si es alterado por una perturbación que produzca un impacto suficientemente fuerte, el cual no dependerá únicamente de la intensidad del suceso sino también, y como ya se ha comentado, de las posibles inestabilidades difícilmente perceptibles insertas en el interior del sistema (Martín Vide, 1993). De este modo, desde la perspectiva de los sistemas dinámicos complejos, el riesgo, de por sí, ya caracteriza un estado del mismo; incluso las condiciones iniciales, equivaliendo a una situación de crisis potencial (Cardona, 2000). Una bifurcación no solo depende de la acción de un agente perturbador o de un detonante. También puede ser un suceso o un proceso acumulativo de deterioro de unas condiciones de inestabilidad: equilibrio al borde del caos, como estado que favorece o facilita que se desencadene la crisis ante la ocurrencia del suceso detonante o la superación de un umbral crítico del proceso de deterioro (Thom, 1985).

3. Reflexiones finales

Intentando hacer un resumen de todo lo expuesto hasta ahora, siempre desde el punto de vista físico y dejando un tanto aparte la visión más epistemológica y filosófica, lo primero que debemos preguntarnos es si el mundo es mecánico o termodinámico. Teniendo en cuenta lo que se ha ido desarrollando hasta este punto, se puede decir que la opción termodinámica es la más plausible. Si queremos ver el mundo desde un punto de vista mecánico o dinámico no podemos olvidar que estaremos hablando en todo momento de sistemas aislados, independientes del mundo exterior, mientras que la descripción termodinámica habla de sistemas que interaccionan con el ambiente que los rodea. Siguiendo la segunda Ley de la Termodinámica, vemos que son los sistemas que disipan energía. El fin de la disipación de la energía es reequilibrar el sistema, hacerlo estable de nuevo. Hay que tener en cuenta que los sistemas inestables, de continuo, no permiten crear estructuras estables, por lo que no hubiese sido posible crear estructuras biológicas. Es aquí donde toma un protagonismo esencial la irreversibilidad. Los fenómenos irreversibles conducen a nuevas

estructuras. Son nuevas estructuras que trascienden la simetría euclidiana del espacio (Einstein, 1984). Un buen ejemplo de ello es la inestabilidad de Bénard¹⁰.

Si repetimos este experimento una y otra vez, los resultados son siempre diferentes, y esto nos lleva a la antinomia que nos está persiguiendo desde el principio; cuando nos encontramos lejos del equilibrio las situaciones no están determinadas y siempre encontramos el elemento azaroso. La mecánica cuántica introdujo el azar en la física que desde un principio se pensó que aparecía a nivel micro, pero se ha demostrado que también permanece a nivel macro. Cuando nos alejamos del equilibrio aparece la no linealidad que conlleva nuevos estados y comportamientos de la materia. Estos nuevos estados conllevan intrínsecamente el elemento histórico que alcanza a la totalidad de los sistemas, desde los más sencillos a los más complejos, lo cual nos permite describirlos.

La mayoría de estas nuevas estructuras aparecen más allá de un punto llamado de bifurcación que es donde se rompe la simetría estructural preexistente. Es aquí cuando el sistema se torna extremadamente sensible a las condiciones exteriores. Desde el exterior van llegando señales que el propio sistema es capaz de captar y discriminar. La mayoría son ruido, pero en un determinado instante una de estas señales encaja como si fuera un interruptor y empieza a amplificarse. Este extremo es comprobable en las estructuras químicas subyacentes en muchos sistemas biológicos. Son interruptores lentos pero muy sensibles (Prigogine, 1991). La pregunta es si estas señales aparecen en la totalidad de los sistemas. Podría asegurarse, sin poder comprobarlo, que debería ser así ya, que todos los sistemas, desde los más sencillos a los más complejos, tienen un mismo funcionamiento, que sus relaciones con el mundo exterior o mejor dicho con sistemas superiores son las mismas y que el comportamiento regido por las leyes naturales debe ser el mismo para todos los sistemas (Barrow, 2002). Todo esto tiene unas connotaciones de dimensiones extraordinarias a la hora de poder predecir el comportamiento futuro de un determinado sistema. Ya no solo se tratará de modelizar el comportamiento futuro de un sistema, sino que se necesitará discernir qué signos no son ruido, qué interruptores están actuando en ese sistema, cuál o cuáles de estos interruptores son susceptibles de conectarse a esas señales y en qué momento lo harán.

En este sentido, el sistema puede “querer” escoger la señal más conveniente en ese momento, lo cual aún complica más su predicción, ya que el sistema intentará adaptarse a las condiciones más favorables para su reequilibrio en cada momento. No olvidemos que los sistemas disipativos buscan el equilibrio incansablemente. Cambios externos en un sentido pueden llevar a cambios internos en otro. Los sistemas, como todo lo demás en la naturaleza, no solo tienen inputs orgánicos o inorgánicos, sino que también tienen influencias externas a nuestro planeta y que son

¹⁰ La inestabilidad de Bénard se verifica en un estrato calentado por debajo. Cuando se supera cierto umbral, empiezan a crearse corrientes de convección resultantes de la interacción de no equilibrio entre el flujo de calor y la gravitación. Se puede observar un estrato caliente superpuesto a uno frío y corrientes de convección que van de abajo a arriba y de izquierda a derecha y viceversa.

de ámbito universal como la gravedad, las fuerzas electromagnéticas, etc. (Barrow, 2002).

Es también interesante reseñar que si por un lado el sistema es altamente inestable y difícil de predecir, por otro, siempre y cuando se encuentre en condiciones de no vacío, es atraído ineludiblemente hacia un punto o puntos. Este es el punto atractor. Cuando nos movemos en dimensiones de números no enteros hablaremos de atractores fractales. Un ejemplo interesante en este sentido es la extremada variabilidad climática durante la historia de la Tierra. En el caso de las temperaturas, esta variabilidad ¿puede deberse al azar, o más bien a que estas se dirigen siempre a uno o más puntos de atracción que variará con las condiciones y factores externos reinantes en cada momento?

Cuando hablamos de disipación de energía, desde un punto de vista matemático, se da a entender que el espacio de fases¹¹ de un sistema dinámico caótico, ya sea discreto o continuo, se va transformando con el paso del tiempo, se va moviendo u orbitando hacia una región dominada por el atractor. Si este movimiento es no lineal, el atractor es extraño. Los atractores, en definitiva, son formas geométricas complejas y sin volumen que revelan el comportamiento que se da a largo plazo en el espacio de fases. Es el espacio hacia el que es atraído el comportamiento de un sistema.

Lorenz nos dio la clave para entender el comportamiento caótico del atractor extraño surgido de innumerables iteraciones. Es una simple operación de estirado y plegado continuo producida en el espacio de fase. Es aquí donde nos encontramos con una divergencia exponencial, teniendo en cuenta que los atractores tienen un tamaño finito y que las órbitas no pueden divergir infinitamente de forma exponencial. Es aquí cuando, gracias al plegado del atractor, órbitas que siguen caminos cada vez más alejados en algún momento se acercarán de nuevo aunque nunca se intersectarán. En este momento vuelve a aparecer el azar sito en las mismas órbitas caóticas consecuencia de todo este proceso. Pero este comportamiento conduce a la eliminación sistemática de la información inicial que queda substituida por otra nueva en un bucle inacabable. Esto amplía continuamente la incertidumbre. Los atractores extraños son como amplificadores que llevan las fluctuaciones de nivel micro a un nivel macro. Todo esto nos lleva, como si fuera un bucle, al tema expuesto durante todo este trabajo: la incertidumbre va haciéndose cada vez mayor, cubre todo el atractor y la capacidad predictiva desaparece, simplemente porque la conexión causal entre el pasado y el futuro se rompe. Es así de claro.

La naturaleza está hecha de sistemas dentro de sistemas de manera indefinida. Si focalizamos en un determinado sistema cualquier perturbación exterior no predecible desde el interior del sistema, representa una entrada de energía que acabará destruyendo en alguna de sus partes el patrón existente, lo cual volverá a poner en

¹¹ Un espacio de fase es aquel que alberga y representa gráficamente la relación de la velocidad versus al desplazamiento o el desplazamiento versus al tiempo. Es, en definitiva, un sistema de coordenadas.

marcha el proceso que se acabará al agotar la energía disponible, y que a su vez irá incrementando la complejidad (Margalef, 1993) (Wagensberg, 1986).

Llegados a este punto, la disquisición que se nos presenta viene dada por la posibilidad que tenemos de poder predecir el futuro con un mínimo de garantías, o bien si debemos plegarnos a la evidencia y saber que la predicción es imposible y que, si la intentamos hacer, tiene un margen de error demasiado elevado. Para el tema que nos ocupa, que es la gestión de riesgos naturales, un margen de error excesivamente elevado en las predicciones puede costar un número inasumible de pérdidas humanas y materiales. Debemos ser capaces de poder afinar mucho más en nuestras predicciones e intentar evitar al máximo que el error que emerge en las condiciones iniciales, y que va aumentando exponencialmente, se haga dueño de la evolución futura del sistema. Para ello, se hace necesario que podamos encontrar una manera de poder controlar estos eventos desde el principio; que los sistemas como entidades dinámicas con entradas y salidas y que las influencias e interacciones que reciben de otros sistemas y del entorno donde se mueven, puedan ser mesurables, analizables, evaluables y corregibles en todo caso

En este punto es donde se introduce la Teoría de control de sistemas dinámicos caóticos no lineales. Esta teoría busca poder controlar el caos dentro del sistema, empezando por intentar eliminar la no linealidad del mismo siempre y cuando podamos describir lo más finamente posible el sistema físico que consideremos, lo cual podremos conseguirlo aplicando ecuaciones diferenciales no lineales que actuarán dentro del espacio de fases y que si el sistema lo permite, nos permitirá ajustar o modificar parámetros y rediseñar de nuevo el sistema “a la carta” (Hernández, 2004). Claro está que esto solo puede hacerse con un número muy reducido de sistemas. La realidad es mucho más compleja, ya que la mayoría de veces el sistema se encuentra en una región del espacio de fases en la que el caos actúa con total preponderancia, donde la incertidumbre es máxima y que además no es permitida la modificación de los parámetros internos del mismo. El desarrollo de la Teoría de control de sistemas dinámicos caóticos no lineales, será una posibilidad que exploraremos en posteriores textos.

4. Bibliografía

- Barrow, J.D. (2002): *Las constantes de la naturaleza*. Editorial Crítica. Barcelona.
- Ben-Naim, A. (2011): *La entropía desvelada*. Tusquets Editores. Barcelona.
- Cardona Arboleda, O. D. (2010): *Gestión Integral de Riesgos y Desastres*. Curso del Master Oficial d'Enginyeria del Terreny i Enginyeria Sísmica. UPC. Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports.
- Escohotado, A. (1999): *Caos y orden*. Ediciones Espasa Calpe. Madrid.
- Einstein, A. (1984): *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Alianza Editorial. Madrid.
- Hawking, S.W. (1988): *Historia del tiempo*. Ediciones Planeta De Agostini. Barcelona.

- Hernández de la Sota, C. (2004): Control Inteligente de sistemas dinámicos caóticos. Tesis Doctoral. UPM. Facultad de Informática.
- Jaque Rechea, F. y Aguirre de Cárcer, I. (2002): Bases de la Física medioambiental. Editorial Ariel. Barcelona.
- Jensen, H.A. (1992): Geografía. Historia y conceptos. Ediciones Vicens Vives. Barcelona.
- Lorenz, E.N. (1963): Deterministic non periodic flow. *Journal of the atmospheric sciences*, 20, 130-141
- Mandelbrot, B. (1987): Los objetos fractales. Tusquets Editores. Barcelona.
- Margalef, R. (1993): Teoría de los sistemas ecológicos. Publicacions de la Universitat de Barcelona. Barcelona.
- Martín Vide, J. (1989) Procesos estocásticos (aplicados) en Geografía Física. *Norba revista de Geografía*. 8-9, 421-436
- Martín Vide, J. (1993): Teoría de Catástrofes y la Geografía: aplicaciones en Climatología. *Revista de Geografía*, XXVII-XXVIII, 21-32
- Olcina Cantos, J. y Ayala-Carcedo, F.J. (Coord.) (2002): Riesgos Naturales. Editorial Ariel. Barcelona
- Prigogine, I. (1991): El nacimiento del tiempo. Tusquets Editores. Barcelona.
- Prigogine, I. (1996): El fin de las certidumbres. Editorial Taurus. Madrid.
- Prigogine, I. Nicolis, G. (1997): La estructura de lo complejo. Alianza Editorial. Madrid
- Prigogine, I. (1999): La leyes del caos. Editorial Crítica. Barcelona.
- Smith, L. (2007): Caos: Una breve introducción. Alianza Editorial. Madrid.
- Solé, R.V., Manrubia, S.C. (2000): Orden y Caos en sistemas complejos. Fundamentos. Edicions UPC. Barcelona.
- Solé, R.V., Manrubia, S.C. (2001): Orden y Caos en sistemas complejos. Aplicaciones. Edicions UPC. Barcelona.
- Thom, R. (1985): Parábolas y Catástrofes. Tusquets Editores. Barcelona.
- Wagensberg, J. (Ed) (1986): Proceso al azar. Tusquets Editores. Barcelona.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los profesores que me han ayudado incondicionalmente a tirar adelante este trabajo. Sin su ayuda y ánimo no hubiera sido posible. Especialmente a los Profesores Doctores Javier Martín Vide y Jorge Olcina Cantos, por su gran ayuda a la hora de enfocar el trabajo y a sus continuas correcciones para darle un formato lo más científico y didáctico posible, al Profesor Doctor Bartolomé Delgado Cerrillo por su ayuda en la parte de estilo y formal, a la Profesora Mari Paz Martínez Jiménez por su amable ayuda en la traducción al francés y a mi amiga Maria Klewer por su ayuda en la traducción al inglés. Sin ellos no habría salido adelante este trabajo.