

desajustes sociales en la estructura de la tenencia, asentamientos humanos marginales en áreas degradadas (Blanco-Alarcón 1992).

De acuerdo con lo anterior, un desastre es la materialización del riesgo y significa un impacto ambiental que puede tener una dimensión variable en términos de volumen, tiempo y espacio. Algunos son causa de pocas pérdidas de vidas; otros afectan millones de personas. Algunos son momentáneos; otros son lentos y duran muchos años. Algunos están localizados en pocos kilómetros cuadrados; otros cubren varios países.

Aunque científicamente todo impacto ambiental intenso podría considerarse como un desastre, el sentido común de las personas reconoce como desastres sólo aquellos que modifican significativamente el volumen o la distribución de la población humana. Por esta razón, sucesos que ocurren en áreas "vacías", en donde no existen asentamientos humanos, raramente son percibidos como desastres. No obstante, es obvio que no existe un criterio único para calificar como desastre un suceso demográfico. Una población grande, por ejemplo, puede ser más afectada que una pequeña en términos absolutos, pero menos afectada en términos relativos (Clarke 1989). En consecuencia, aunque sea ampliamente aceptado, la dimensión de un desastre no sólo depende de la cantidad de población humana que puede ser afectada sino, también, de su escala en términos ecológicos, económicos y sociales. Un suceso podría no afectar personas en forma directa, pero podría causar perjuicios sobre otros elementos naturales renovables y no-renovables que, igualmente, le darían la categoría de desastre.

Desde el punto de vista temporal, habitualmente los desastres son interpretados como graves consecuencias que causan sucesos súbitos, aunque este calificativo depende del contexto. Súbito en relación con el tiempo de duración de una vida es diferente de súbito en relación con el curso de la historia de la humanidad. Existe una real dificultad para definir la duración de un desastre aunque, como se mencionó anteriormente, muchos la relacionan con sus efectos demográficos. En un extremo de la escala del tiempo podrían localizarse como impactos instantáneos desastres provocados por sucesos tales como terremotos, erupciones volcánicas o accidentes aéreos, mientras que como impactos prolongados pueden considerarse otros desastres causados por fenómenos tales como la desertificación, las hambrunas y las guerras, sucesos que usualmente tienen efectos más severos en términos demográficos. Los desastres repentinos impredecibles cuyas causas históricamente son bien reconocidas producen, en general, un mayor temor y son percibidos como más catastróficos; justamente por que son inesperados y causan sensación. Otro aspecto temporal se relaciona con la frecuencia de los fenómenos. Algunas poblaciones, por ejemplo, están habituadas a un ambiente propenso, donde la ocurrencia de los sucesos llega a ser casi parte de su estilo de vida, a los cuales llegan a acostumbrarse o adaptarse; a diferencia de poblaciones localizadas en ambientes en los que ciertos sucesos, por su poca recurrencia, llegan a ser considerados como eventualidades fortuitas.

Espacialmente el impacto de las amenazas es extremadamente variado. Algunos desastres son aislados y localizados; otros son difusos y dispersos. Por lo tanto, algunos sólo son el resultado de los efectos sobre una población, mientras que otros son lo suficientemente amplios, es decir los daños y las consecuencias del fenómeno cubren varias poblaciones. El área de influencia de un accidente aéreo o de una erupción volcánica, por ejemplo, es considerada generalmente como pequeña y discreta; mientras que una sequía, una hambruna o una epidemia puede llegar a afectar grandes superficies,

incluso de orden continental, trascendiendo en ocasiones fronteras políticas. En conclusión, el concepto de impacto ambiental o de desastre es relativo a la manera como se le califica (dimensión temporal, espacial o de volumen) y depende de la valoración social que la comunidad le asigna.

6.2 Fundamentos del enfoque holístico

La teorización científica se halla entre dos estrategias: o bien buscar el acuerdo exacto entre la teoría y la experiencia, siendo inevitables desacuerdos atribuidos a los ruidos locales de los errores experimentales de carácter insignificante. O, por el contrario, aceptar la inexactitud cuantitativa, en provecho de una precisión cualitativa que convendrá mejorar. Por muchos años, las explicaciones de la mecánica clásica y los planteamientos que se derivan de los aportes de Newton y Laplace condujeron a una visión determinista de la naturaleza. Un determinismo cuya conquista principal era postular que todo fenómeno era predecible y en el cual el tiempo básicamente podría entenderse como una “ilusión”; algo que se podía eliminar. No obstante las observaciones visionarias de Maxwell y Poincaré, acerca de la dependencia sensible de las condiciones iniciales en algunas situaciones, y del desarrollo de la mecánica estadística y la física cuántica, científicos como Einstein y Planck mantuvieron su esperanza en un determinismo, simplicidad y causalidad del mundo; aun cuando sus aportes significaron extraordinarios “rompimientos de simetría” en relación con la física clásica. Sin embargo, la posibilidad de “reducir” el comportamiento de un sistema natural a sus componentes básicos, con el fin de explicarlo en forma satisfactoria se logra sólo en casos relativamente simples, que corresponden más a la excepción que a la regla y cuyas idealizaciones lo alejan de la realidad. Las probabilidades, que se creyó que expresaban básicamente la ignorancia de verdaderos procesos deterministas subyacentes demostraron ser esenciales y no reductibles a ninguna forma de determinismo. Hoy, los científicos paulatinamente se han ido convenciendo que un reduccionismo ingenuo, que busque reducir todas las cosas a sus partes constituyentes más pequeñas, se encuentra fuera de lugar. Una aproximación más honesta consiste en establecer, y demostrar, un postulado que explique exactamente en qué sentido una solución exacta de un problema aproximado puede contemplarse como una solución aproximada a un problema exacto (Stewart 2001). Cuando se pretende tener en cuenta la complejidad de los sistemas, es decir, cuando se requiere que la descripción sea más completa, es necesario introducir elementos estocásticos.

No se intenta aquí estimular un debate filosófico en relación con la causalidad del mundo, pero sí describir los fundamentos para postular una conjetura o un “modelo” a cerca del riesgo y el desastre desde una perspectiva científica moderna. La gente hoy tiende a hablar de modelos mejor que de teorías o leyes. El determinismo, no del mundo sino de las descripciones, tal vez sea una abstracción y una simplificación que se practica para hacer inteligible la complejidad cotidiana y actuar con ella. Y el indeterminismo quizás sea la propia desesperación que embarga cuando para entender o explicar la complicación se requiere de una información a la que no es posible acceder. Lo que se necesita es descubrir si hay principios generales gobernando el desarrollo de la complejidad en su totalidad que puedan ser aplicados a toda una variedad de situaciones diferentes sin que se vean enmarañados en sus particularidades.

ciencia es una actividad transitiva condicionada históricamente. Si el conocimiento tiene una estructura acumulativa entonces también la tiene la realidad en sí misma. Bhaskar argumenta que debe organizarse de la misma forma. La estratificación ontológica forma una jerarquía de estructuras abiertas y anidadas así que, en la medida en que la ciencia penetra cada nuevo estrato descubre la base ontológica de esas entidades y estructuras que previamente no tenía cubiertas. Existe una división científica del trabajo en una estratificación ontológica del universo desde las partículas elementales hasta las estructuras sociales. Anderson (1972) sugiere que cada estrato de la realidad es estructuralmente único y opera de acuerdo con sus propias leyes, y demanda sus propios protocolos de investigación. Los mecanismos de rompimiento de simetría proveen los fundamentos ontológicos para la emergencia de nuevos niveles de realidad de los niveles establecidos. El rompimiento de simetría permite que cada nuevo nivel ontológico se organice el mismo alrededor de su propia serie de principios irreducibles. Puesto que diferentes principios regulan las actividades de cada nivel, ningún nivel es reducible a aquellos de los cuales ha emergido. La pirámide resultante de complejidades producida por la geometría de simetrías rotas es la fuente, por lo tanto, de nuestra división moderna de profundización de la labor científica.

Harvey y Reed (1999) proponen que siguiendo la lógica de Bhaskar lo que se necesita es una visión científica del mundo para llenar los vacíos filosóficos, y que esa visión es la ciencia de la termodinámica del no equilibrio. Esta nueva ciencia estudia los mencionados "sistemas disipativos", que involucran una amplia variedad de sistemas caóticos: procesos químicos catalíticos que a menudo parecen imitar la vida misma; sistemas evolutivos constituidos física y biológicamente; y los sistemas sociales. Estos autores proponen una matriz en la cual se definen seis estrategias de modelación o niveles de abstracción, en los cuales jerárquicamente los supuestos deterministas decrecen, para enfrentar doce diferentes niveles de complejidad ontológica. Dichas estrategias son las modelaciones predictiva, estadística, iconográfica, estructural, simulativa, y la narrativa histórica; y los niveles de complejidad van desde las regularidades determinantes del universo físico, la evolución biológica, la organización ecológica biótica, la organización ecológica institucional, la estructura de sistemas socio-técnicos, y sucesivamente en orden de jerarquía hasta la cultura hegemónica y sus procesos de conflicto de clases y evolución social.

Según este paradigma los modelos predictivo, estadístico e iconográfico deben restringirse a niveles ontológicos en los cuales el fenómeno puede ser legítimamente tratado como un agregado estadístico; es decir, como un compuesto aditivo, numerable e intercambiable de unidades individuales. Los modelos estructural, simulativo o narrativo pueden ser usados donde no son adecuados los tres primeros y, por lo tanto, son útiles en niveles ontológicos en los cuales procesos poblacionales, productos culturales y eventos históricos son la regla. Un uso inadecuado de los modelos o abstracciones en contextos con los cuales no son consistentes conduce a falacias: como intentar modelar los desarrollos culturales como objetos gobernados por leyes básicas de la naturaleza, ignorando el rol de la intencionalidad humana, o a considerar los hechos de la naturaleza como puras y discrecionales construcciones humanas.

Así las abstracciones de la realidad resultan coherentes según sea el contexto o nivel ontológico correspondiente. Los patrones explotados por la física pueden ser imperfectos, meras aproximaciones; pero son buenas aproximaciones y eso no puede ser justamente una coincidencia. La lógica del reduccionismo es la más precisa en las

profundidades matemáticas y llega a ser gradualmente más “borrosa” en la medida que se asciende a niveles más complejos como la biología y las ciencias sociales. De hecho, el modelo Darwinista de la evolución ha llegado a ser más verbal o figurativo que matemático. Es decir, construido en un muy preciso y sutil lenguaje, y mucho de esto soportado en submodelos matemáticos y simulaciones. La lógica explicativa es ya muy precisa pero su estilo ha cambiado sutilmente. Sin duda, la estrategia del reduccionismo parece ser de lejos menos exitosa cuando se piensa acerca ya de altos niveles de organización de la evolución. La cadena de explicación de los niveles de “abajo” hacia “arriba” llega a ser más difusa, y una cuidadosa mirada muestra que alguno de sus eslabones hacen falta.

Así, las leyes de la naturaleza, en una luz diferente, son patrones que prevalecen en algún contexto escogido. Depende de las preguntas que se formulen y justamente no son acerca de su química o su física fundamental. Hay medidas que tienen sentido dependiendo del contexto escogido. No hay duda de que el marxismo contiene más ideología que el psicoanálisis; que el psicoanálisis contiene más ideología que la física atómica y que la física atómica contiene más ideología que la topología algebraica. La complejidad de un sistema tentativamente se puede definir como la cantidad de información necesaria para describirlo.

La complejidad de los ecosistemas y sociedades es el resultado de una red de transacciones y comunicaciones entre organismos individuales. El concepto de estructura no necesariamente emerge de promediar el comportamiento de sus componentes, como podría ser en el caso de las leyes de los gases o la estadística de sus fluctuaciones. La estadística es justamente un camino para que el sistema colapse el caos de su fina estructura y desarrolle una característica confiable a gran escala. Cualquier sistema interesante es típico en algún sentido, en un contexto lo suficientemente limitado; y si se quiere entender dicho sistema, ayudará mucho saber cuál es dicho contexto (Stewart 2001). La explicación reduccionista de la dinámica de un asentamiento humano es interna, opaca y complicada. La contextual o representativa (simulativa) es externa, transparente y simple. Hay que buscar explicaciones en términos de contexto tanto como en contenido.

Aquí se propone una abstracción estructuralista y simulativa para tratar el fenómeno del desastre y las condiciones de riesgo en un sistema socio-técnico, como lo es un asentamiento humano (un centro urbano) en su ambiente natural. La “fractalidad” de las fronteras en aspectos reales hace que no exista una línea que los diferencie sino una frontera difusa. Holismo es una alternativa al reduccionismo, siempre que se diferencie de la abstracción común (la oriental), que consiste en ver únicamente el aspecto global en detrimento de lo particular: un sistema se considera como una unidad y a menudo se ignora su contexto. Aquí, holismo significa integralidad (Smuts 1926), proviene de *holos* que en griego significa “todo”, “íntegro”, “entero”, “completo”, en tanto que el sufijo *ismo* denota su práctica (Weil 1990; CONICIT 1999). El enfoque holístico, al que aquí se refiere el autor, significa proceso de integración y desagregación, conservando las sinergias o relaciones entre componentes. Es la noción de pensamiento complejo, a la que se refiere el sociólogo francés Edgar Morin (1994), que separa y reúne, que distingue – sin desunir– y religa.

La imagen holográfica es una buena representación contextual de la visión integral que aquí se desea proponer. En la imagen holográfica cada parte de la figura que uno ve esta dispersa sobre toda la superficie. Por esta razón, en cada fragmento de la imagen

esta toda la figura y no un pedazo de ella como en una fotografía convencional. La visión de un fragmento de la imagen equivale a tener un cierto grado de resolución; corresponde a la calidad del conocimiento que se tiene acerca de algo y no a una parte de ese algo. Esta propiedad del holograma explorada por Karl Pribram en neurología y en física por David Bohm (teoría holónica del universo) se plantea aquí como el enfoque mediante el cual se debe intentar llevar a cabo la estimación del riesgo sísmico urbano.

La naturaleza opera de una manera holística para crear un equilibrio armonioso en el que cada ingrediente interacciona con los otros ingredientes vecinos para producir un todo que es más que la suma de sus partes. No es difícil ver por qué la perspectiva holística oriental supuso un obstáculo para el progreso científico. Niega la presunción de que se puede estudiar partes del mundo aislándolas del resto –que puede analizar el mundo y entender una de sus partes sin conocer el todo. La perspectiva holística a la que aquí se hace referencia supone que la naturaleza es intrínsecamente no lineal, de manera que las influencias no locales prevalecen e interaccionan entre sí para formar un todo complejo. No es que la concepción oriental estuviera desencaminada; era sencillamente totalitarista, absolutista y tal vez prematura. Sólo desde hace poco, los científicos, ayudados por potentes programas gráficos de ordenador, han logrado hacerse con la descripción de sistemas no lineales intrínsecamente complejos. Un estudio fructífero de las leyes naturales que pretenda llegar a dominar alguna vez las complejidades holísticas ocasionadas por la no linealidad, debe comenzar con los problemas lineales simples. El mundo real es inmensamente complicado: es una madeja de hilos anudados y enmarañados, cuyo principio queda fuera de nuestro alcance y cuyo fin no podemos conocer (Barrow 1994). Se utilizan aquí los fundamentos de la teoría general de sistemas, como abstracción o modelo simulativo (representación) que investiga el paralelismo entre los diversos campos de la ciencia.

En el mundo real no se observan leyes de la naturaleza, se observan resultados. Puesto que la representación más eficaz de estas leyes viene dada por ecuaciones matemáticas, se podría decir que sólo se ven las soluciones de esas ecuaciones y no las ecuaciones mismas. Los resultados son mucho más complicados que las leyes; las soluciones mucho más sutiles que las ecuaciones. Aunque una ley de la naturaleza pueda poseer una cierta simetría, ello no significa que todos los resultados de la ley necesiten manifestar la misma simetría. La situación en que se rompe la simetría de los resultados de una ley se denomina “ruptura de simetría”. A ella se debe la vasta diversidad y complejidad del mundo real.

Hay varias formas de inteligibilidad, ciencia dura, causalidad y clasificación. No menos es la inteligibilidad de estructura, es decir, la que relaciona un “todo” con unas “partes” más o menos arbitrariamente elegidas. Se habla de “análisis” cuando se parte del “todo” para llegar a las “partes”, y de “síntesis” cuando el procedimiento es el inverso. Aunque la física teórica siempre ha mirado a los usuarios de esta forma de inteligibilidad con una leve compasión, no tiene otra posibilidad en aceptarla como la posible cuando de complejidad se trata. El éxito de la física, en parte, se debe a haber hecho la vista gorda a la complejidad. No se pueden seguir buscando fórmulas matemáticas para predecir la estabilidad de un ecosistema de 20 000 variables. En rigor, un sistema así ni siquiera puede “observarse”. No es que sea invisible por pequeño, ni por grande, sino por complejo. No puede observarse ni modelarse en el sentido clásico. Eventualmente, puede “simularse”. La simulación va camino de

alcanzar el rango de las otras dos grandes y tradicionales vías de aproximación a la realidad, esto es, el de la vía teórica y de la vía experimental (Wagensberg 1998).

Los postulados que aquí se presentan no tienen la intención de ser propiamente una teoría sobre el riesgo y el desastre desde el punto de vista de los sistemas dinámicos complejos. Más bien, puede entenderse como una conjetura que podrá ser con el tiempo verificada mediante simulación. Entre tanto se propone una conceptualización estructuralista y figurativa, utilizando representaciones de la interacción del asentamiento humano y su ambiente; aproximación que puede llegar a ser útil para la gestión del riesgo y la prevención de los desastres.

6.3 Postulado de los sistemas dinámicos

El análisis de todo proceso real comienza con la selección de un conjunto de elementos o partes de la realidad, operativamente interactivos, del que se quiere conocer su comportamiento global. Esta porción del mundo que interesa se conoce con el nombre de *sistema*. Este concepto se aplica a cualquier ámbito del saber por lo que así se habla, no sólo de sistemas físicos, químicos o biológicos, sino también de un sistema económico o financiero, de un ecosistema, de un sistema lingüístico, etc.

El método que la ciencia emplea para el análisis y comprensión de esta pequeña ventana del universo, o sistema, consiste en construir un modelo. Con él se pretende explicar los acontecimientos presentes o pasados que afectan o han afectado al sistema y, lo que es más importante, al menos desde el punto de vista del método científico, el modelo ha de servir para predecir su comportamiento futuro. Por otra parte, que un modelo es también un sistema. Se trata de un sistema abstracto en el que los elementos que intervienen son variables y las relaciones entre ellas vienen expresadas mediante conjuntos de ecuaciones.

Para que un sistema real pueda ser formalizado debe satisfacer una serie de requisitos cuya formulación precisa queda en manos de los teóricos de la ciencia. La construcción de un modelo formal que se ajuste "lo mejor posible" al sistema real en estudio es una tarea que conlleva una gran dificultad y, en cualquier caso, el resultado no es necesariamente único. Por ejemplo, en los complejos sistemas que aparecen en biología, sociología o economía (Lorenz 1997), donde el número de factores que intervienen puede ser del orden de miles o millones.

Aunque la intención es conocer la realidad y las observaciones que se realicen y las cualidades que se obtengan de los modelos se refieren en última instancia a la realidad que el modelo representa, lo cierto es que, dadas las restricciones impuestas en su construcción, no existe un isomorfismo exacto entre el conjunto de estados del sistema real y el conjunto de estados del sistema formal.

Un proceso se dice *determinista* si todo su curso futuro y pasado están unívocamente determinados por su estado en el momento presente. Lo que equivale a decir que los valores observables de los estados del sistema en un instante vienen dados por las observaciones en el instante de partida –por las condiciones iniciales–. En definitiva, que para distintas series temporales de los estados del sistema los científicos han sido capaces de descubrir una relación que las comprime a todas ellas, es decir, han descubierto una ley científica. Por el contrario, en un proceso *aleatorio* no se aprecia claramente una regularidad en las observaciones que permita establecer una ley determinista. La única manera de describir el comportamiento del sistema es indicando

En el caso de sistemas simples y lineales, puede ocurrir que las ecuaciones admitan una solución explícita, o sea, una fórmula que exprese cualquier estado futuro en función del inicial. Una solución explícita proporciona un atajo, un algoritmo simple que precisa sólo el estado inicial y el tiempo final para predecir el futuro sin pasar por los estados intermedios. La utilidad de la solución o de la imagen que así se obtiene reside en la posibilidad de representar el comportamiento del sistema en forma geométrica. Un espacio hipotético que tiene tantas dimensiones como el número de variables necesarias para especificar un estado de un sistema dinámico dado. Algo así como el espacio de lo posible. No son exactamente los estados que ocurren, son también los que podrían haber ocurrido. Un péndulo con rozamiento, por ejemplo, termina por detenerse, lo que significa que la órbita o trayectoria se aproxima a un punto en el espacio de configuraciones o también llamado espacio de fase. Dicho punto no se mueve: está fijo; por atraer a las órbitas próximas, recibe el nombre de *atractor*. Algunos sistemas no tienden al reposo a largo plazo, sino que recorren periódicamente una sucesión de estados. Un atractor es, *grosso modo*, a lo que tiende, a lo que es atraído, el comportamiento de un sistema. Un sistema puede tener varios atractores. Si así ocurre, diferentes condiciones iniciales pueden llevar a diferentes atractores. En el caso de los asentamientos humanos o los centros urbanos, considerando la dinámica de la interrelación social-espacial las ciudades son atractores de la actividad (Dendinos 1997).

Los éxitos en la obtención de soluciones explícitas en el caso de muchos sistemas simples suscitaron la esperanza de que tales soluciones existieran para cualquier sistema mecánico. Desgraciadamente, se sabe ahora que esto no es así, en general. El comportamiento impredecible de los sistemas dinámicos “irregulares”, como los llamó originalmente Edward Lorenz (1995) a los sistemas caóticos, no puede expresarse mediante una solución explícita. Consecuentemente no hay atajos para predecir su comportamiento. El espacio de configuraciones proporciona, no obstante, una herramienta poderosa para describir el comportamiento de estos sistemas. El conjunto de puntos que evoluciona hacia un atractor se llama su cuenca de atracción. Los atractores caóticos actúan como multiplicadores que elevan las fluctuaciones microscópicas a una expresión macroscópica. Esto explica porqué no existen las soluciones exactas, los atajos para predecir el futuro. Tras un breve período, la incertidumbre en la medición inicial cubre el atractor por entero y se pierde toda capacidad predictiva: simplemente no hay conexión causal entre el pasado y el futuro. El marco del que emerge el “caos” es la llamada teoría de los sistemas dinámicos. La importancia de dicho comportamiento fue reconocida por primera vez por Maxwell en la segunda mitad del siglo XIX, luego por Poincaré y Lyapunov a finales del mismo siglo, y posteriormente en el siglo XX por Birkhoff, Smale y Lorenz antes de que se le conociera por su actual nombre, que se debe a Li y Yorke.

Un sistema dinámico consta de dos partes: la noción de estado (la información esencial de un sistema) y una dinámica (una regla que describe cómo evoluciona el estado en el tiempo). La evolución se representa en el espacio de configuraciones donde las coordenadas de un punto son el conjunto de valores simultáneos de las variables. En general, las coordenadas del espacio de configuraciones varían con el contexto; en el caso de un sistema mecánico podrían ser posiciones y velocidades y, en el de un modelo ecológico, las poblaciones de las diferentes especies.

Una aparente paradoja es que el caos es determinista, generado por reglas fijas que no encierran en sí mismas ningún elemento de azar. En principio: el futuro está enteramente determinado por el pasado, pero en la práctica las pequeñas incertidumbres se agrandan, de suerte que, si bien el movimiento es predecible a corto plazo, no lo es a largo plazo. Este aserto presupone que no se pueden realizar mediciones que estén completamente libres de incertidumbre. El descubrimiento de los sistemas dinámicos con dependencia sensible ha creado un nuevo paradigma en la construcción de modelos científicos. Por una parte establece los límites fundamentales en la capacidad de avanzar predicciones. Pero, por otra, su determinismo inherente muestra que muchos fenómenos aparentemente aleatorios son más predecibles que lo que se había pensado. Antes que la idea de caos estuviera bien establecida, los científicos habían abordado el estudio de procesos complicados de esta índole como un problema originalmente estadístico. Esto es, consideraban que el proceso sometido a análisis era, a todos los efectos prácticos, "aleatorio". Se sabía de la aleatoriedad en sistemas con un número grande de grados de libertad —o variables necesarias para describir el sistema— pero no que ocurría con una enorme generalidad, insospechada hasta hace poco, incluso en sistemas de aspecto muy simple con pocos grados. El comportamiento caótico está determinado por leyes bien precisas, mientras ocurre consiste en cosas que *no son* de verdad aleatorias sino que *sólo lo parecen*. Este comportamiento no es aleatorio puesto que puede ser generado con una ecuación completamente determinista. Un sistema caótico puede aparecer mas o menos aleatorio dependiendo de su complejidad.

El descubrimiento de la ubicuidad del caos es, sin duda, la tercera gran revolución de la física del siglo XX (Scientific American 1994). Su existencia afecta incluso al mismo método científico. El procedimiento clásico para verificar una teoría consiste en hacer predicciones y contrastarlas con los datos experimentales. Ahora bien si los fenómenos son caóticos, las predicciones a largo plazo resultan intrínsecamente imposibles. Y esto debe tenerse en cuenta al juzgar los méritos de una teoría. El proceso de verificación se hace así mucho más delicado, y se debe basar en propiedades estadísticas y geométricas antes que en la predicción. El caos presenta un nuevo desafío al punto de vista reduccionista, según el cual un sistema puede entenderse descomponiéndolo y estudiando cada parte por separado. Si esta idea ha prevalecido en la ciencia es en parte porque hay muchos sistemas en los que el comportamiento del todo es realmente la suma de sus componentes. El caos demuestra, sin embargo, que un sistema puede tener un comportamiento complicado que emerge en virtud de simples interacciones no lineales entre unos cuantos componentes.

En la dinámica del ambiente natural, en el cual ocurren cambios intensos tanto lentos como súbitos en una escala de tiempo relativa se tipifica el comportamiento caótico, la no linealidad y la dependencia sensible. De la misma manera, la dinámica de las interacciones y procesos de un asentamiento humano obedece a pautas y atractores que pueden cambiar por inestabilidades internas de este sistema socio-técnico, como por perturbaciones o descargas del ambiente en el cual se encuentra.

Mandelbrot (1975, 1987) utilizó el término *fractal* introducido por Hausdorff y Besicovitch en 1919, para describir sistemas con dimensionalidad fraccionaria. La propiedad de los fractales es la *autosimilitud*: en muchos sistemas fractales, diversas piezas adecuadamente elegidas se hacen idénticas a todo el conjunto cuando se les amplifica apropiadamente. Lo cual implica desde luego que las diversas subpiezas de cada pieza, aumentadas, equivaldrían a la pieza y, por ende, a todo el sistema. Hay

otros fractales que sólo son autosimilares estadísticamente; las piezas pequeñas, al ampliarse no se superpondrán al sistema entero sino que tendrán una apariencia del mismo tipo general. Existe una estrecha ligazón entre la fractalidad y el caos: un *atractor extraño* es un atractor con estructura fractal. La fractalidad es una nueva simplicidad imbuida en una aparentemente más complicada.

Partiendo de la hipótesis de que el riesgo –que es un estado del sistema socio-técnico– es un atractor que tiene una dimensión fractal, se puede establecer que los escenarios de riesgo a diferentes escalas están vinculados aunque no necesariamente de manera simétrica y sincrónica; es decir sus relaciones de una escala a otra pueden variar de manera no lineal. Un escenario de riesgo a nivel local sería un fractal de escenarios de riesgo a otras escalas (Maskrey 1998); por ejemplo, el riesgo para una familia en relación con el riesgo a nivel de un asentamiento humano o de una región.

La dimensión fractal, equivalente a la denominada “capacidad” propuesta por el matemático ruso Andrei Kolmogorov, es una medida de la complejidad y la heterogeneidad y no corresponde a un número entero. En lugares donde los escenarios de riesgo son muy heterogéneos y complejos la dimensión fractal podría ser alta (un valor cercano a 2 o más). En otros contextos, donde los escenarios son más homogéneos y muestran menos diferenciación o “rugosidad”, la dimensión fractal podría ser baja (cercana a 1). La diferenciación, por ejemplo, podría ser una estratificación socio-económica altamente dispar. Así, en contextos donde el riesgo tiene una baja dimensión fractal para que ocurra un desastre sería necesario una perturbación muy intensa para que sus efectos puedan constituirse en crisis, a diferencia de contextos donde el riesgo tiene una alta dimensión fractal donde una mínima perturbación podría significar un desastre.

Por otra parte, en contextos donde la dimensión fractal del riesgo es alta, se requiere una mayor resolución de observación para poder apreciar la compleja variabilidad del riesgo a nivel local. Estos son los contextos caracterizados por numerosos desastres pequeños altamente diferenciados, aún cuando éstos sean provocados por un solo suceso, como un gran terremoto. La diferenciación visible del riesgo aumenta según se aumenta la resolución de observación, sobre todo en contextos donde la dimensión fractal es muy alta (Maskrey 1998). Esto significa que no existe una respuesta adecuada a la pregunta de qué efectos suceden en un contexto determinado, sin especificar la resolución de observación y la dimensión fractal del riesgo.

Una estimación del riesgo en forma global sólo permite diferenciar niveles de riesgo entre grandes regiones o países, por ejemplo. Según se aumente la resolución, es posible visualizar mayores niveles de complejidad, pudiendo identificar las diferenciaciones entre provincias, asentamientos humanos o ciudades, comunidades y eventualmente entre hogares e individuos. En aquellos contextos donde el riesgo tiene mayor dimensión fractal, mediante aumentos en la resolución se podría apreciar cada vez más diferenciación. En aquellos contextos donde el riesgo tiene baja dimensión fractal, existirá un límite donde al aumentar la resolución no se obtiene una mayor diferenciación del riesgo de los componentes.

6.3.2 Teoría de la complejidad

Un diccionario podría sugerir que el caos es un estado de completa confusión o una falta de organización alguna. Pero en el campo de la dinámica no lineal, como ya se

mencionó, el término implica propiedades específicas de turbulencia en un sistema no lineal. Existe un enorme terreno para la confusión en torno a términos como caos y complejidad. Para la mayoría caos significa azar. En el ámbito de los sistemas dinámicos no lineales no es así. También para la mayoría, complejo puede significar casi lo mismo que caótico. Los sistemas más complejos exhiben atractores; estados en los que el sistema acaba estabilizándose en función de sus propiedades. Al examinar estos atractores esto sirve como una gráfica fundamentación de la noción de “orden en el caos”. Siempre los datos numéricos describen un régimen caótico apareciendo desordenado. Su representación geométrica crea una única forma de orden. Una estabilidad existe en el caos. El comportamiento caótico es globalmente estable y localmente inestable.

El azar (epistemológico) es el nombre que se le da a la ignorancia –léase leyes insuficientes, débil potencia de cálculo, torpes observaciones (limitadas)– el azar es un concepto de conocimiento. Este azar admite medida y control, de él han nacido términos nuevos (fluctuaciones, ruido, error, mutación) con vocación de describir la esencia del cambio de la complejidad del mundo. Los sistemas que se ven al alrededor, como las formaciones geológicas o un centro urbano, gozan de cierta estabilidad (por eso pueden verse). Eso significa que pueden defenderse de la contingencia, del azar, ruido o fluctuaciones propias y de su entorno. Adaptarse significa amortiguar las sorpresas que el mundo depara. Hacerse insensible a ellas. La ignorancia de un sistema con respecto a su entorno es un reto para el sistema, de modo que éste se ve obligado a aumentar su complejidad para hacer frente a tal ignorancia. Evolucionar es superar una adaptación y asumir la siguiente. La otra alternativa, es claro, desaparecer.

Lo complejo es una categoría cualitativamente distinta de lo simple que no se debe sólo a una acumulación de elementos. Pero como el comportamiento simple y complejo coexisten en íntima unión en la generalidad de los sistemas físicos, más que antagónicos resultan complementarios. La diferencia entre orden y caos depende de la limitación de la capacidad en la medida del mundo. Si se pudiera determinar con precisión infinita los datos iniciales, muchos movimientos serían a la vez predecibles y caóticos.

Se ha demostrado en los últimos años que un número creciente de sistemas exhiben un comportamiento estocástico provocado por un simple atractor caótico. Los latidos del corazón, la oscilación de concentraciones químicas y muchos osciladores eléctricos y mecánicos. Actualmente se busca el caos, en sistemas tan dispares como las ondas cerebrales y los procesos económicos. Importa señalar que la teoría del caos está lejos de constituir una panacea. Cuando hay muchos grados de libertad, los movimientos son complicados y aleatorios. Pero, aun cuando se determine que un sistema es caótico, esto no aclara mucho; saber que un sistema es caótico no facilita la predicción de su comportamiento. Son tantas las variables que intervienen, que todo lo alcanzable es una posible descripción estadística, y las propiedades estadísticas esenciales pueden obtenerse sin tener en cuenta el caos.

El término complejidad se utiliza a veces para indicar la dependencia sensible y todo lo que ella conlleva. A veces se hace una distinción entre *caos* y *complejidad*, refiriéndose con el primer término a la irregularidad temporal y con el segundo a la irregularidad espacial. El comportamiento caótico se revela como la regla antes que la excepción, en lugar de una ecuación en particular. Se ha llegado a considerar que los fenómenos lineales, predecibles y simples prevalecen en la naturaleza porque se inclina

a elegirlos para el estudio. Son los más fáciles de entender. En el fondo el mundo no es inteligible por esa razón. Los fenómenos simples pueden ser analizados por partes. El todo, en ese caso, no es más que la suma de sus partes. Así pues, se puede entender algo sobre un sistema sin entender todo sobre él. Los sistemas caóticos no lineales son diferentes. Requieren de un conocimiento del todo, al igual como lo predica el holismo, para poder entender sus partes, porque el todo equivale a más que la mera suma de sus partes. En un sistema complejo no hay una clara división entre una "parte" y otra, lo que impide conseguir "toda" la información. La emergencia de simplicidad "colapsa el caos" trae orden a un sistema que parece estar deslizándose esperanzadamente en un mar de fluctuaciones aleatorias (Cohen y Stewart 1994). Aunque el caos exige la *no linealidad*, ésta no asegura la existencia del caos.

Puede que no resulte especialmente sorprendente que el comportamiento cualitativo de un sistema pueda cambiar cuando la intensidad de determinada influencia perturbadora pasa de cierto nivel crítico. Un equilibrio es inestable si un estado que difiere levemente del equilibrio, por ejemplo el que se podría introducir moviéndolo un poco, termina por evolucionar enseguida en un estado ampliamente diferente. La definición de equilibrio inestable o precario tiene mucho en común con la de la dependencia sensible: ambas suponen la amplificación de diferencias inicialmente pequeñas. Los sistemas caóticos pueden poseer estados de equilibrio, que son necesariamente inestables. En una familia de sistemas dinámicos, se le denomina bifurcación un cambio brusco del comportamiento a largo plazo de un sistema, cuando el valor de una constante cambia, pasando de ser inferior a ser superior a determinado valor crítico. Una bifurcación, por ejemplo, un cambio de fase: líquido a gaseoso.

Desde la óptica de la gestión del riesgo el ambiente se puede entender como un sistema dinámico complejo cuyos elementos se hallan en permanente interacción o como una red de relaciones activas entre dichos elementos, que determina las condiciones de existencia de los mismos y de la totalidad del sistema. Cuando dentro de la dinámica o proceso de interacción ocurren cambios, transformaciones o alteraciones que no son posibles de absorber o "disipar" por falta de flexibilidad o capacidad de adaptación del sistema, surge una *crisis* (Wilches-Chaux 1989). Esta bifurcación, que puede presentarse como consecuencia de una reacción en cadena de influencias, representa el *desastre*, calificativo que depende de la valoración social que la comunidad le asigne y que en todos los casos es un impacto ambiental desfavorable. Las crisis que pueden presentarse como consecuencia de eventos exógenos al sistema o como resultado de tensiones no resueltas al interior del mismo. Se desemboca en desastre cuando se dan reacciones en cadena, *runaway reactions*, que a la manera de bucles positivos incrementan las fuerzas disociativas hasta el punto de volverlas tendencias predominantes (Morin 1995), enfrentado 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 la desaparición del sistema que se contempla.

La evolución en el tiempo de los complejos sistemas sociales y biogeoquímicos no puede ser representada adecuadamente por funciones lineales o curvas suaves y continuas, excepto en el caso de aproximaciones sobre cortos segmentos de tiempo (Dodrecht *et al.* 1988). La evolución real de estos sistemas usualmente contiene retroalimentaciones positivas y comportamientos no lineales e incluso discontinuidades, lo que hace muy difícil predecirlos aunque en retrospectiva sea fácil explicarlos

(Merkhofer 1987). Los conceptos de “vulnerabilidad”, o predisposición a la afectación, y “resiliencia”, o capacidad de recuperación, entran a jugar un papel fundamental debido a su significativa relación con la posible ocurrencia de discontinuidades. Un sistema puede saltar de un atractor a otro si es alterado por una perturbación suficientemente impactante, lo cual no depende solamente de la intensidad del suceso sino, también, de posibles inestabilidades no fácilmente perceptibles del sistema. De esta forma se puede plantear, desde la perspectiva de los sistemas dinámicos complejos que el *riesgo* caracteriza un estado del sistema socio-técnico –incluso las condiciones iniciales– y equivale a una situación de crisis potencial (Cardona 2001). Una bifurcación, que depende no solamente de la acción de un agente perturbador o detonante, que bien podría ser un suceso o un proceso acumulativo de deterioro, sino también de unas condiciones de inestabilidad –equilibrio al límite del caos–, que es el 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. Metodológicamente este planteamiento puede expresarse (Ecuación 6.1) como:

$$C_p = T_a \cdot I_c \quad [6.1]$$

donde C_p (*crisis potential*) expresa la factibilidad de crisis, T_a (*trigger agent*) representa la posibilidad de ocurrencia de un agente detonante, e I_c (*instability conditions*) son las condiciones de inestabilidad del sistema (Cardona 1995/99a). Las condiciones de inestabilidad son debilidades o deficiencias que pueden ser de carácter ambiental o ecológico, demográfico o social, económico, institucional o político, cultural o ideológico, entre otras. Esta expresión, la ecuación 6.2, es más general que la propuesta previamente por el autor (1985) expresada mediante la ecuación 2.2 (descrita en el capítulo 2), que corresponde a un caso particular de comportamiento de un sistema dinámico específico, en el cual no solamente es importante el agente detonante o la perturbación, es decir la *amenaza*, sino las condiciones dinámicas de inestabilidad, o la *vulnerabilidad*. Lo que le da soporte al planteamiento de que la vulnerabilidad tiene especial incidencia en el potencial de desastre, que se traduce en la crisis en este caso. Los sistemas dinámicos no pueden olvidar las perturbaciones, excepto que sean *disipativos*, es decir poco vulnerables o “resilientes”.

La figura 6.1 representa la estabilidad de un sistema y los puntos de transición a un nuevo estado de comportamiento, mediante la ecuación logística $X_{n+1} = k X_n (1 - X_n)$. El valor de X representa el estado del sistema, mientras que el valor constante de k describe los parámetros o características del sistema que causan que este sea estable, oscilante, oscilante de manera compleja o caótico. El valor de k se encuentra entre 1.0 y 4.0. El sistema se bifurca aproximadamente en 3.0, y se mueve a una segunda bifurcación en $k = 3.5$, y en caos en aproximadamente $k = 3.66$. Sistemas con un k bajo son bastante resilientes o disipativos. Sistemas con un k alto son caóticos y operan en trayectorias inesperadas e impredecibles ante las o fluctuaciones o perturbaciones. Según Priesmayer (1994), la información que provee el valor de k en sistemas sociales, obtenido de un proceso de regresión que permita detectar la ecuación logística subyacente, ofrece un iluminante indicador de la manera como operan dichos sistemas y la posibilidad de orientación la gestión que debe llevarse a cabo en ellos.

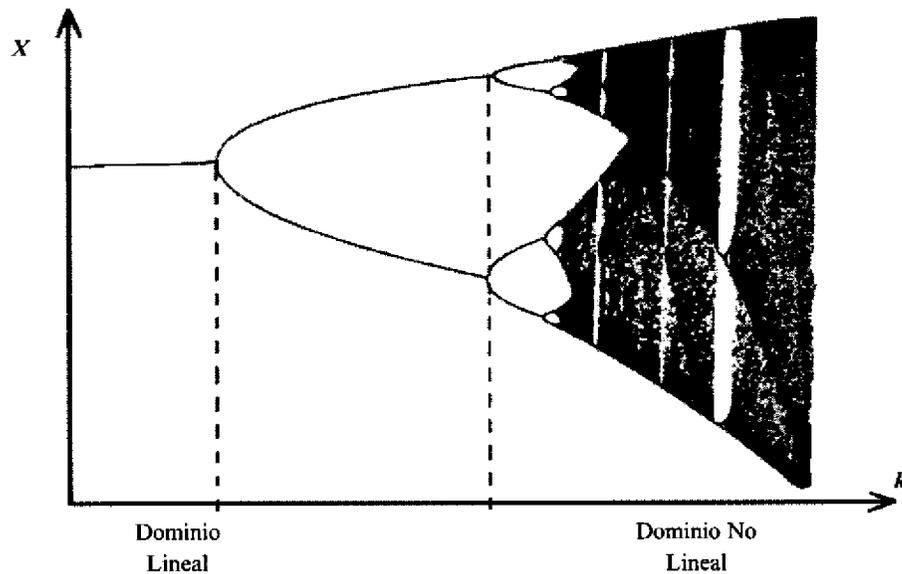


Figura 6.1: Estabilidad de un sistema y puntos de transición siguiendo la ecuación logística.

Con el soporte matemático de la teoría de bifurcaciones y centrándose preferentemente en un tipo particular de sistemas dinámicos (sistemas tipo gradiente) el matemático francés René Thom desarrolló una teoría sobre las singularidades especiales, o catástrofes, de determinadas familias de funciones (Carreras *et al.* 1990). Su teoría, que cuenta con tantos adeptos como detractores, resulta ser una herramienta útil en el estudio cualitativo de sistemas. La teoría de las catástrofes, o teoría de la bifurcación, da la impresión de ser la teoría del caos. Sin embargo, la primera es acerca de cómo cambian sistemas dinámicos estables cuando se altera el sistema un poco y la segunda es acerca de sistemas más complicados donde a los sistemas no es necesario alterarlos sino dejar que se desarrollen. Las dos ideas se pueden combinar y pensar acerca de qué pasa con estados caóticos cuando el sistema ha sido alterado un poco. Esta síntesis es la utilizada aquí para representar el proceso de riesgo y desastre de un sistema socio-técnico que es el asentamiento humano bajo la influencia de retroalimentaciones generadas con el ambiente natural. La teoría de las catástrofes en el lenguaje de hoy ofrece el estudio del comportamiento de sistemas dinámicos, que pueden tener uno o varios atractores. Cuando tienen varios, dependiendo de las condiciones iniciales es posible terminar en un comportamiento diferente. Una bifurcación puede conducir a un cambio de atractor, a uno desconocido, o a ninguno. El límite del caos se encuentra donde la información llega al umbral del mundo físico, donde consigue ventaja sobre la energía. La habilidad de reconocer la presencia de caos presenta una ventaja estratégica en el comportamiento “adaptativo” ante ese caos. En cada caso, será crítico identificar el grado de caos, distinguiendo entre el “borde del caos” y el caos total.

La ciencia de la complejidad trata de la estructura y el orden. Orden surgiendo de un sistema dinámico complejo; como por ejemplo: las propiedades globales que fluyen del comportamiento general de la sociedad. La estabilidad, es decir la defensa de un sistema a la acción del entorno es una propiedad emergente (Lewin 1995). En