

ALGUNOS PROBLEMAS EN LA ESTIMACIÓN DE LA MAGNITUD DE UN IMPACTO EN LOS EIA (ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL) A PARTIR DE LA CONDICIÓN DE SISTEMA COMPLEJO ADAPTATIVO DE LOS SISTEMAS AMBIENTALES

SOME PROBLEMS IN ESTIMATING THE MAGNITUDE OF AN IMPACT IN EIA (ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENTS) BASED ON THE COMPLEX ADAPTIVE SYSTEM CONDITION OF ENVIRONMENTAL SYSTEMS.

FECHA DE RECEPCIÓN: 15-11-25 / FECHA DE ACEPTACIÓN: 10-12-25

Edgar Hugo Sanchez Infantas

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Correo electrónico: esi@lamolina.edu.pe

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3895-4585>

RESUMEN

El presente artículo trata de los problemas en la estimación de la magnitud de un impacto en los Estudios de Impacto Ambiental (EIA), dada la naturaleza de los sistemas

ambientales como sistemas complejos adaptativos. El objetivo del artículo es identificar los inconvenientes de usar modelos aditivos y lineales tradicionales en EIA recurriendo a la simulación. La metodología empleada fue la simulación, utilizando un modelo de dinámica de sistemas basado en la población de vicuñas de la Reserva Nacional de Pampa Galeras, donde se evaluó la respuesta del sistema a una perturbación puntual (una sequía). De la investigación se concluye que los sistemas exhiben agencia (autoorganización) y se mueven permanentemente, lo que obliga a los EIA a determinar la trayectoria del ecosistema en lugar de solo su estado actual. Además, no existe conmensurabilidad entre la magnitud del impacto y la respuesta del sistema, ya que la estructura interna del sistema, con sus bucles de retroalimentación y no linealidades, puede amplificar o amortiguar los efectos de las perturbaciones, cuya huella temporal puede durar periodos sorprendentemente largos.

Palabras clave: Estudios de Impacto Ambiental, Bucles de alimentación, Dinámica de sistemas, No linealidad, Sistemas Complejos adaptativos.

ABSTRACT

This article addresses the problems in estimating the magnitude of an impact in Environmental Impact Assessments (EIA), given the nature of environmental systems as complex adaptive systems. The aim of the article is to identify the drawbacks of using traditional additive and linear models in EIA by resorting to simulation. The methodology employed was simulation, using a system dynamics model based on the vicuña population of the Pampa Galeras National Reserve, where the system's response to a specific disturbance (a drought) was evaluated. The research concludes that systems exhibit agency (self-organization) and are in constant motion, which compels EIA to determine the trajectory of the ecosystem rather than just its current state. Moreover, there is no commensurability between the magnitude of the impact and the system's response, since the internal structure of the system, with its feedback loops and nonlinearities, can amplify or dampen the effects of disturbances, whose temporal footprint can last surprisingly long periods.

Keywords: Environmental Impact Studies, Feedback Loops, System Dynamics, Nonlinearity, Adaptive Complex Systems.

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de los impactos ambientales (EIA) de las obras de ingeniería es un caso particular del manejo de la naturaleza y sus recursos. Cilliers et al (2013) en una evaluación del rol de la modelización y la complejidad en el manejo de estos recursos naturales, señalan que las interacciones que suelen haber entre los componentes naturales y los sociales alcanzan tal complejidad que terminan por hacer altamente problemática la predicción de los estados futuros del sistema en respuesta a las intervenciones humanas. Esto es lo

que justamente sucede en los EIA los que, como señala Lawrence (2003) “ *son un proceso sistemático de ... identificación, descripción, medida, predicción, interpretación,..., de impactos potenciales o reales ... de acciones humanas propuestas,..., sobre el ambiente...*” Por tanto, las dificultades señaladas por Cilliers et al (2013) son de total aplicación a la evaluación ambiental.

Pope et al (2013) en una evaluación del desempeño de los EIA y de otras formas de evaluación ambiental, señalan que son de resaltar las innovaciones que están apareciendo, lo que ha llevado al uso de marcos conceptuales como los del manejo adaptativo y a instrumentos como la dinámica de sistemas.

Por su parte, Bowd et al (2015) al proponer incluir la teoría de los sistemas social ecológicos (SES) en la elaboración de los EIA, señalan que al describir el ecosistema se incluye el efecto de las escalas pero que su dinámica interna no se considera explícitamente. Esto se puede resolver con el uso de la dinámica de sistemas como señalan Pope et al (2013).

Ahora bien, ¿por qué la inclusión de la dinámica de sistemas sería tan importante en la descripción de un ecosistema y en la anticipación de sus estados futuros? Como señalan Cilliers et al (2013) un ecosistema es un tipo particular de sistema y como tal tiene un comportamiento complejo. Esta complejidad aparece como producto de las interacciones entre los componentes del sistema de modo que la descripción sólo de los componentes y no de sus interacciones, como se hace rutinariamente en los EIA, está perdiendo información importante. El comportamiento complejo es así, un producto emergente de las interacciones entre los componentes del sistema.

Estos sistemas complejos, además, tienen muchos componentes, cuyas interacciones – al menos algunas – son no lineales, crean bucles de retroalimentación, son locales – en el sentido de que ninguna parte “conoce” el comportamiento del conjunto –; en adición, son termodinámicamente abiertos con lo que operan lejos del equilibrio termodinámico y al mismo tiempo son históricos (Cilliers et al., 2013). Estas características y su pertinencia al momento de entender la sostenibilidad de los ecosistemas ya había sido puesta de manifiesto por Kay y Regier (2000).

De este modo, describir un impacto y anticipar sus efectos sobre un ecosistema usando métodos como las matrices de Leopold van a simplificar la descripción del impacto y no van a permitir evaluar todas sus implicancias (Bowd et al., 2015). El problema parece ser consecuencia de que el modo usual de caracterizar la significancia de un impacto es descomponerlo en una serie de atributos (extensión, duración, intensidad, reversibilidad, por ejemplo) los mismos que se expresan en escalas ordinales a las que se asignan números y que luego se suman (MINAM, 2022; Conesa Fernández – Vitoria, 2010). Es decir, se usa un modelo aditivo para caracterizar el impacto. Esta misma lógica aditiva se usa para caracterizar los efectos conjunto de varios impactos.

En el presente caso se ha buscado de identificar algunos de los inconvenientes de este proceder recurriendo a la simulación con un modelo construido mediante la dinámica de sistemas. Partiendo de un modelo de simulación del comportamiento del ecosistema puna en el ámbito de la Reserva Nacional de Pampa Galeras, se han identificado los efectos de una perturbación puntual – una sequía – sobre una variable biológica que viene a expresar la respuesta del sistema: la población de vicuñas. Si bien una sequía es un agente natural, a diferencia del impacto de una obra de ingeniería, en ambos casos se trata de evaluar la respuesta del sistema a un agente externo. Por lo demás, varias de las características que Cilliers et al (2013) señalan para los sistemas complejos, están presentes en el modelo de Galeras; es el caso de las no linealidades y los bucles de retroalimentación, a los que se suman las respuestas demoradas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 EL MODELO

El modelo de dinámica de sistemas se ha construido usando la información de la Reserva Nacional de Pampa Galeras (Sánchez, 1997); tiene una estructura en la que hay componentes endógenos y exógenos. Los primeros corresponden a los procesos de auto-organización del sistema poblacional y son consecuencia de sus bucles de retroalimentación, sus respuestas no lineales y sus demoras de respuesta. Este sistema hace frente a un factor exógeno, el que se percibe entonces como una variable estocástica y corresponde a la precipitación pluvial. Esta dualidad endógeno/exógeno sigue lo que sugieren Berryman y Kindlmann, (2008). Es justamente este agente externo, aleatorio, el que en el presente caso nos permite evaluar el efecto de un impacto sobre un sistema ambiental.

El modelo gráfico (figura 2.1) tiene una variable de estado (N) que representa el tamaño de la población de vicuñas adultas y dos variables de flujo: RECLUTAS, que representa el ingreso de nuevos individuos adultos y, MUERTOS AD, que representa la mortalidad de la población adulta. Además hay dos variables auxiliares: DISPAST, que representa la disponibilidad de alimento y, PPN que viene a ser la productividad primaria neta, es decir, la capacidad de producción de alimento de la pradera para las vicuñas. Finalmente, la última variable auxiliar es PP que viene a ser la precipitación pluvial, la única variable estocástica del modelo.

El modelo incluye conectores – flechas rojas – que sirven para definir relaciones de causalidad entre las variables. Como ya se dijo, el agente externo, es decir el impacto que opera sobre el sistema poblacional es la precipitación (PP). Existen además dos bucles de retroalimentación: DISPAST-RECLUTAS-N-DISPAST y DISPAST-MUERTOS AD-N-DISPAST. Ambos bucles son de retroalimentación amortiguadora.

Otras características de sistema complejo que están presentes vienen a ser las relaciones

no lineales en la dependencia que tiene RECLUTAS con relación a DISFAST y en la dependencia de MUERTOS AD frente a DISFAST. Por último, la complejidad del sistema se manifiesta en las demoras de respuesta presentes en las no linealidades señaladas; en efecto, RECLUTAS depende de DISFAST pero con una demora de respuesta de un año; por su parte, MUERTOS AD depende de DISFAST con una demora de tres años.

La información con la que se construyó el modelo es consecuencia del registro de información realizado en la Reserva Nacional Pampa Galeras. Su análisis llevó a identificar las respuestas no lineales y las demoras de respuesta antes señaladas. Los detalles de la parametrización del modelo así como las ecuaciones finales que se han empleado se tienen en Sánchez (1997).

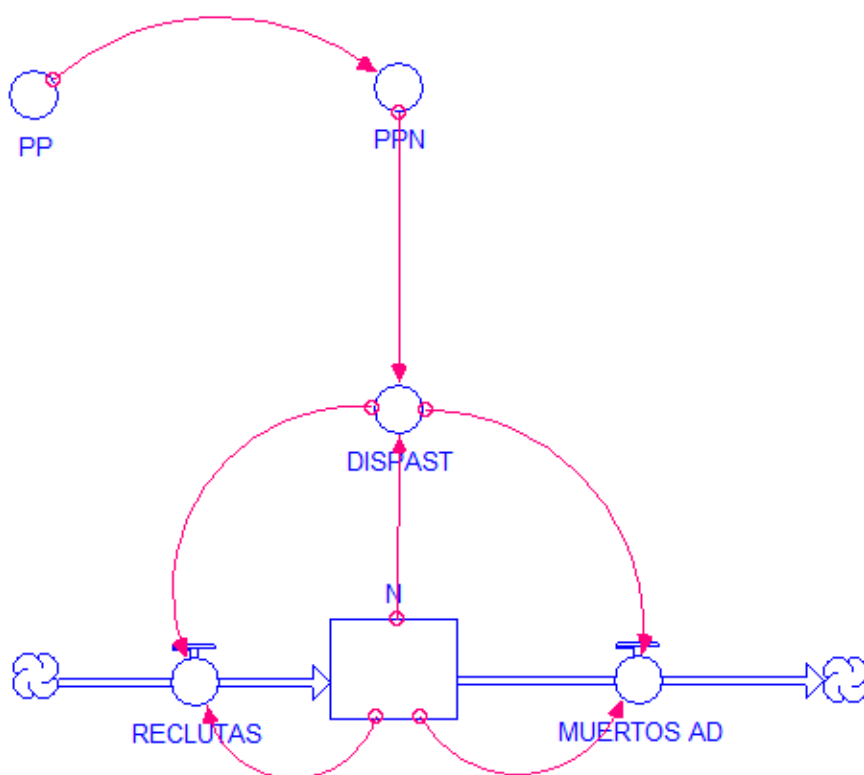


FIGURA 2.1. MODELO DE DINÁMICA DE SISTEMAS DE LA POBLACIÓN DE VICUÑAS EN LA RESERVA NACIONAL DE PAMPA GALERAS.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 DINÁMICA DEL SISTEMA: NO SE REQUIEREN PERTURBACIONES EXTERNAS PARA HACER QUE EL SISTEMA POBLACIONAL SE MUEVA

La figura 3.1 muestra la evolución del sistema poblacional para un periodo de 50 años y manteniendo los parámetros establecidos empíricamente con la información de Pampa Galeras (Sánchez, 1997). La población inicial es de 1000 individuos y la precipitación pluvial se ha mantenido constante (1000 mm/año) durante todo el periodo. Esta figura

muestra la forma en la que usualmente entendemos a los ecosistemas y sus respuestas frente a los agentes externos – los impactos o perturbaciones, por ejemplo –: un sistema que evoluciona hasta una determinada condición la misma que una vez alcanzada se mantiene indefinidamente en estado estacionario. Esta idea es la que permite que se usen herramientas como los Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) (Sánchez y Falero, 2015). En esta forma de ver las cosas, está implícita la idea de que si no hay perturbaciones – variaciones en la lluvia en este caso – el sistema mantiene su estado estacionario. Pero ¿hay evidencia que justifique esta perspectiva?

En la figura 3.2 se tienen condiciones similares a las de la figura 3.1 a excepción de que la respuesta de la mortalidad de los individuos adultos (MORTAD) frente a la disponibilidad de alimento (DISPAST) se ha hecho más fuertemente no lineal. Las ecuaciones usadas en ambas son:

$$(3.1) \text{ MORTAD } t = 0.1949 - 0.0858 \ln \text{ DISPAST } t-3$$

$$(3.2) \text{ MORTAD } t = 0.1949 - 0.858 \ln \text{ DISPAST } t-3$$

El cambio en la no linealidad de la respuesta de la mortalidad a la disponibilidad de alimento es algo que no involucra a un agente externo sino más bien a la estructura interna del propio sistema. La precipitación se mantiene constante a lo largo de los 50 años a pesar de lo cual el sistema poblacional se está moviendo permanentemente. De modo que el sistema se puede mover aunque no haya cambios en su entorno. Esto es a lo que se refieren Kay et al (1999) cuando dicen que los ecosistemas “...no son un mecanismo y más bien exhiben auto-organización, ..., retroalimentación positiva y negativa, autocatálisis, emergencia y sorpresa...”. Por tanto, estos sistemas ya no sólo son pacientes que responden a factores externos que pueden tomar la forma de impactos sino que además son agentes, con sus procesos propios y que pueden evolucionar aún si su entorno se mantiene quieto. Esto es lo que Kay et al (1999) denominan propensión.

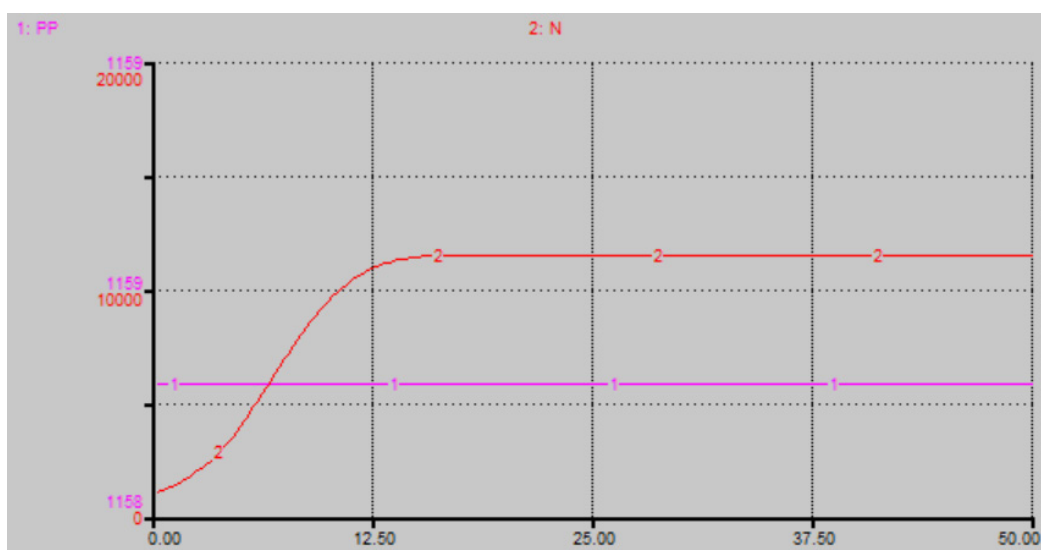


FIGURA 3.1. EVOLUCIÓN DEL SISTEMA POBLACIONAL (2) Y DE LA PRECIPITACIÓN (1) A LO LARGO DE 50 AÑOS.

La implicancia de este tipo de comportamiento para los EIA obliga a que ya no sea suficiente el determinar el estado presente del ecosistema en una línea base; si el sistema se mueve, lo que se requiere es determinar su trayectoria. Esto ya ha sido señalado – en un contexto más general de administración de recursos naturales – por Chapin et al (2009). En segundo lugar, se tiene que revisar la idea de que si un ecosistema cambia – es decir, se mueve – es siempre en respuesta a un agente externo tal como un impacto. El sólo cambio en un ecosistema no se puede usar como indicativo de la presencia de un impacto, cosa que involucra no sólo a los EIA sino también a los programas de monitoreo.

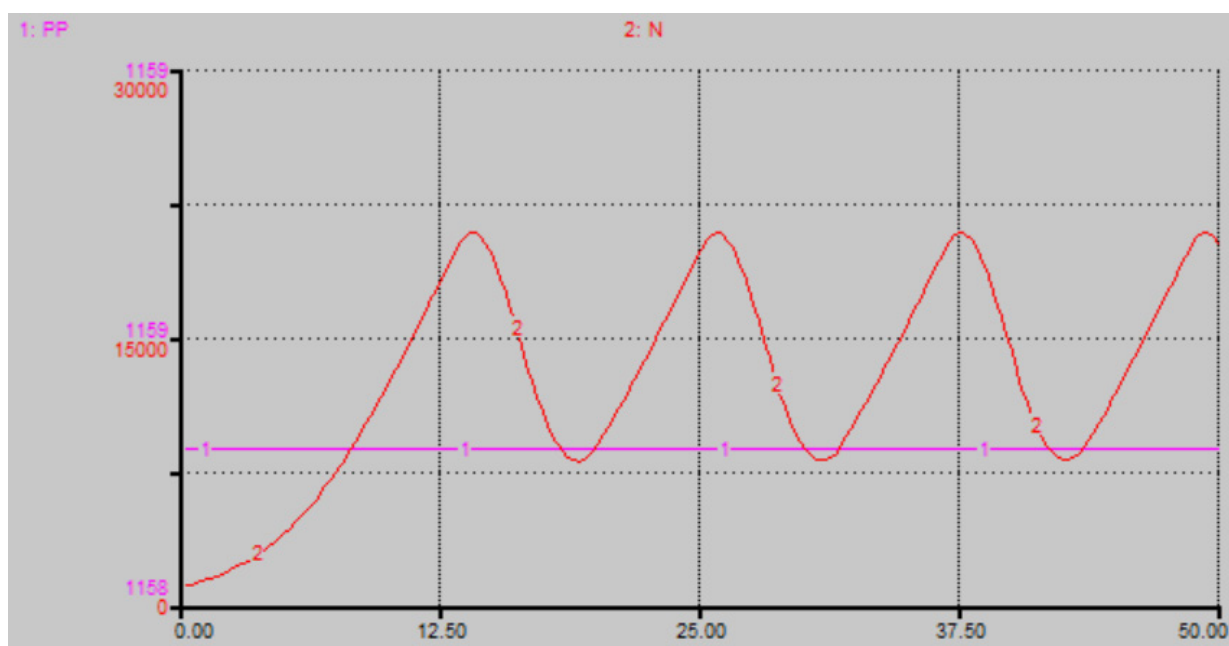


FIGURA 3.2 EVOLUCIÓN DEL SISTEMA POBLACIONAL (2:N) Y DE LA PRECIPITACIÓN (1:PP) A LO LARGO DE 50 AÑOS. LA RESPUESTA DE LA MORTALIDAD DE ADULTOS A LA DISPONIBILIDAD DE PASTOS ES MÁS FUERTEMENTE NO LINEAL QUE EN LA FIGURA 3.1. VER EL TEXTO PARA LOS DETALLES.

Una tercera cosa que se desprende del comportamiento mostrado en la figura 3.2 es la posibilidad de que un ecosistema tenga varios estados alternativos o atractores (Andersen et al, 2008; Beisner et al, 2003; Groffman et al, 2006) a partir de lo cual la idea de Estándar de Calidad – que supone un sólo estado para el ecosistema – pierde sentido (Sánchez y Quinteros, 2017).

Estas tres observaciones obligan a entender la evaluación ambiental, sea con EIA o con programas de monitoreo, como lo señalan Waltner-Toews y Kay (2005) cuando dicen que es una actividad de observación de sistemas humanos y naturales que sintetiza sus hallazgos en una narrativa que describe cómo los ecosistemas llegaron a la situación actual y cómo podrían comportarse en el futuro.

3.2 RESPUESTA DEL SISTEMA POBLACIONAL A UNA PERTURBACIÓN PUNTUAL

La figura 3.3 muestra la respuesta del sistema poblacional frente a una perturbación de carácter puntual representada por una sequía que implica que la precipitación, que desde el inicio se encontraba en 1000 mm/año, en el año 10 experimenta una reducción de su valor a 600 mm/año. Esto representa una perturbación cuya magnitud se puede expresar en un 40%. Ahora bien ¿cuál es el efecto de esta perturbación puntual sobre el sistema poblacional?

El sistema poblacional presenta varias características interesantes en su respuesta; lo primero es que no responde de inmediato. De hecho su tamaño era 10973 individuos en el año 9. La sequía hace que su valor disminuya pero el valor mínimo (10792 individuos) recién lo alcanza en el año 14, es decir, con una demora de cinco años. Una segunda característica es que si bien el sistema recibe una perturbación cuya magnitud era del orden del 40%, su respuesta no tiene la misma magnitud. En efecto, si se compara la población del año 9 con la del año 14 – cuando la población alcanza su valor mínimo como consecuencia de la perturbación – se encuentra que ésta ha tenido una disminución de un 1.65%. Esto muestra la relativa independencia que tiene un sistema en sus respuestas frente a la magnitud de perturbación que recibe. Esta no conmensurabilidad entre la magnitud del impacto que se recibe y la magnitud de la respuesta que se emite es una de las formas de definir lo que son respuestas no lineales en un sistema complejo (Cilliers et al, 2013).

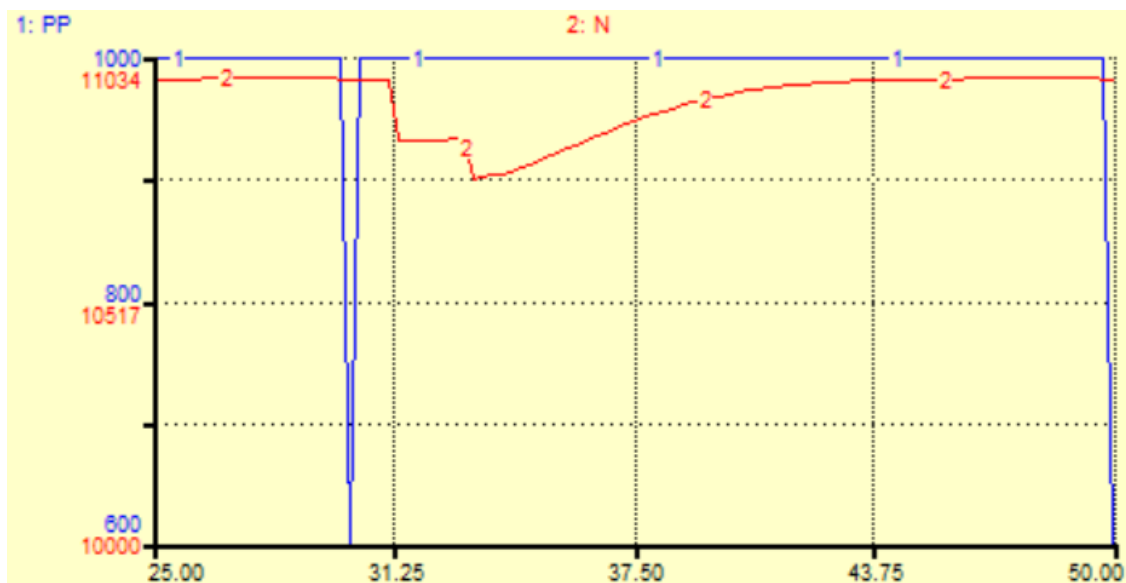


FIGURA 3.3 RESPUESTA DEL SISTEMA POBLACIONAL (N) FRENTE A UNA PERTURBACIÓN PUNTUAL QUE SE EXPRESA EN UNA SEQUÍA REGISTRADA EN EL AÑO 10 Y QUE HACE QUE LA PRECIPITACIÓN (PP) QUE ESTABA EN 1000 MM/AÑO BAJE ESE AÑO A 600 MM/AÑO.

Tal vez uno de los aspectos más críticos de la no conmensurabilidad entre la magnitud de una perturbación y la magnitud de la respuesta del sistema es la muy alta sensibilidad

que los sistemas fuertemente no lineales tienen frente a una perturbación inicial muy pequeña. Este comportamiento – típico del caos determinista – se presenta gráficamente en la figura 3.4, en la que usando el modelo logístico con ecuaciones de diferencias (Berryman y Kindlman, 2008) se ha simulado la trayectoria de dos poblaciones cuya única diferencia es la población inicial: una comienza en 10 individuos y la otra en 11 individuos. Esto se puede interpretar como una perturbación que afecta a la población y que cambia su tamaño inicial en un individuo. El efecto de esta perturbación se amplifica al pasar el tiempo y lo hace al punto que puede superar los 13000 individuos de diferencia entre ambas trayectorias en el año 15. De hecho la diferencia en las poblaciones finales, en el año 30 es de 6091 individuos.

Desde la perspectiva de evaluación de impactos, la diferencia inicial entre ambas poblaciones es la medida de la magnitud del impacto y – como se ha visto – éste se amplifica. Esto implica que no hay impacto pequeño pues un impacto inicialmente calificado como tal puede generar respuestas muy grandes.

Regresando a la figura 3.3, otra cosa que muestra el resultado de la simulación es el tiempo que le toma al sistema poblacional recuperarse de la perturbación recibida. Esto tiene importancia pues representa la posibilidad de estimar – a partir de esta respuesta – la resiliencia del sistema, es decir el tiempo que le toma al sistema recuperar una condición similar a la que tenía inmediatamente antes del impacto. En el presente caso, la simulación muestra que una población similar a la que se tenía en el año 9 recién se alcanza en el año 21, con lo que se puede afirmar que es este el tiempo que le toma a este sistema recuperarse de la perturbación puntual. De este modo, la huella de una perturbación puntual se puede estimar en 12 años, lo que no deja de ser sorprendente para una perturbación puntual. Si a esto se le suman los cinco años que le toma al sistema expresar en su totalidad los efectos de la perturbación, la huella se amplía hasta 17 años, periodo definitivamente muy superior a lo que sería esperable.

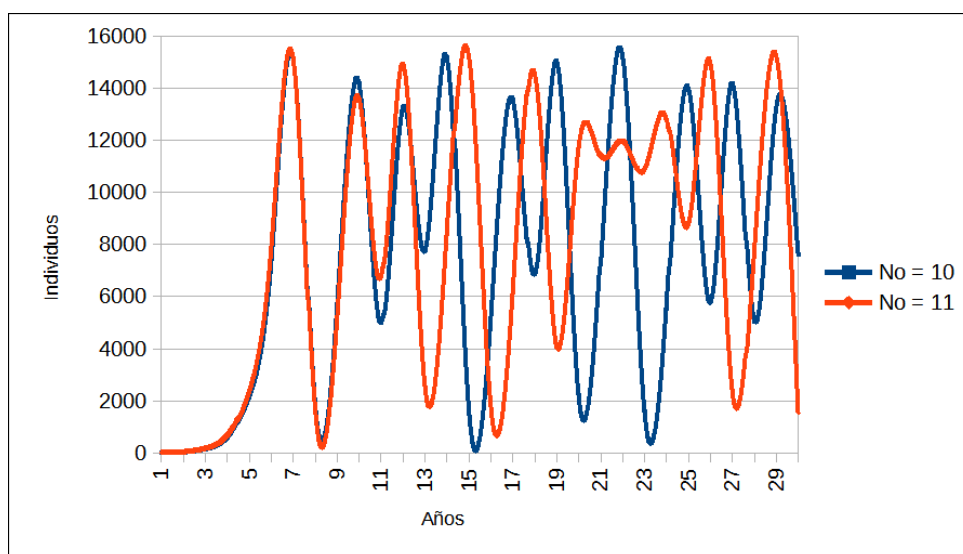


FIGURA 3.4. EVOLUCIÓN DE DOS POBLACIONES CON EL MODELO LOGÍSTICO EN ECUACIONES DE DIFERENCIAS. LA ÚNICA DIFERENCIA ENTRE AMBAS POBLACIONES ES SU TAMAÑO INICIAL No) QUE DIFIERE EN UN INDIVIDUO.

Por tanto, lo que la simulación de una perturbación puntual ha mostrado es que el sistema no responde de inmediato, que su respuesta puede ser diferente en magnitud a la magnitud de la perturbación y, finalmente, que la huella temporal de la perturbación dura tiempos relativamente largos. Si en el caso mostrado esta huella es de 17 años cabe preguntarse si en ese tiempo el sistema poblacional se encontrará libre de perturbaciones de modo que una nueva perturbación llegue sólo después que los efectos de la anterior se hayan disipado por completo. Intuitivamente se puede decir que ese escenario resulta siendo poco plausible, con lo que nos encontramos frente a la necesidad de evaluar el efecto de perturbaciones que se suceden en el tiempo de modo que sus efectos se pueden potenciar o se pueden cancelar dadas las interacciones que tienen entre sí. La siguiente sección discute este escenario.

3.3 RESPUESTAS DEL SISTEMA POBLACIONAL FRENTE A UN CONJUNTO DE IMPACTOS.

Una secuencia de perturbaciones que afectan a un sistema puede ser simulada recurriendo a una serie temporal en la que la fuente de las perturbaciones – la precipitación en el presente caso – se presenta como una serie que exhibe ruido blanco, es decir, una serie completamente al azar. De hecho, como Chatfield (1996) señala, se trata de “...una secuencia de variables aleatorias que son mutuamente independientes e idénticamente distribuidas...” Esto implica impactos a veces por exceso y a veces por defecto, es decir, años muy lluviosos y sequías, en el caso que nos ocupa.

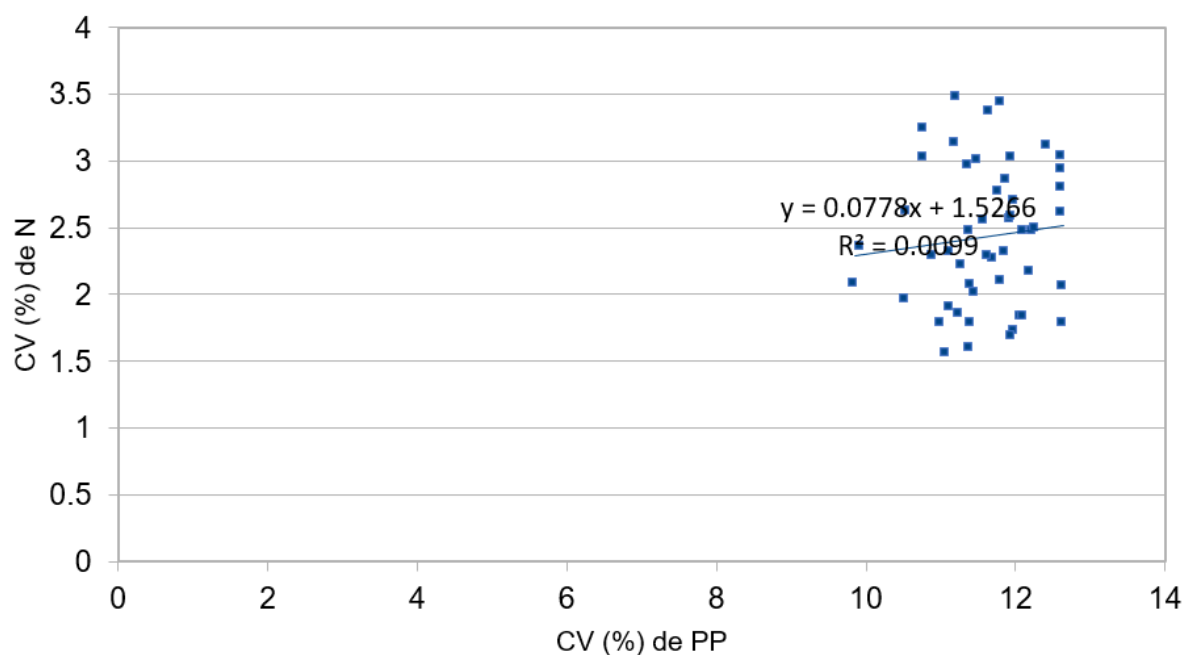


FIGURA 3.5. RELACIÓN ENTRE LA VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN (CV PP) Y SU EFECTO SOBRE LA VARIABILIDAD DEL SISTEMA POBLACIONAL (CV N), AMBAS EXPRESADAS EN PORCENTAJES.

Se han simulado 50 series de precipitación aleatoria – ruido blanco – de 50 años cada una y se ha registrado la evolución de las poblaciones sometidas a estas secuencias de perturbaciones. Se ha medido la magnitud que las perturbaciones aplican sobre las poblaciones, mediante el Coeficiente de Variabilidad – CV que cada serie de precipitación tiene; la respuesta del sistema poblacional a esta secuencia de perturbaciones se ha medido con el correspondiente CV de la población misma. Esto ha dado lugar a 50 pares de datos cuya relación muestra el diagrama de dispersión de la figura 3.5. Se esperaba que la relación fuese directa y significativa entre ambos CV.

La relación entre la variabilidad de las perturbaciones y la de las respuestas, es directa pero no alcanza significación estadística. Esto está sugiriendo que no es cierto que una perturbación mayor en la lluvia habrá de generar una respuesta mayor en la variabilidad del sistema poblacional. Esto sugiere que no sólo importa la magnitud total de la perturbación – cosa que mide CV PP – sino que además puede ser importante analizar la calidad de estas perturbaciones, por ejemplo, mediante la autocorrelación temporal de las mismas.

Una cosa que queda clara, sin embargo, en la figura 3.5 es que, de modo general, hay un efecto amortiguador en la población frente a las perturbaciones que recibe. El histograma de los 50 valores que han tomado CV PP (azul) y CV N (rojo), se muestran en la figura 3.6, siendo evidente que las perturbaciones tienen una variabilidad sensiblemente mayor (mediana = 11.68) que las respuestas de la población (mediana = 2.41).

Todo esto está sugiriendo que los sistemas poblacionales no se comportan como meros transmisores de las perturbaciones que los afectan, cosa que también se ve cuando se evalúa la calidad de la variabilidad que significan tanto las perturbaciones como las respuestas poblacionales. Se ha tomado al azar una de las 50 simulaciones y se ha evaluado la autocorrelación temporal que han exhibido en los 50 años tanto la precipitación como la población (figura 3.7).

La figura muestra el comportamiento de la precipitación, que exhibe una carencia total de autocorrelación temporal y que corresponde a lo que se denomina ruido blanco, que fue lo que se implementó en la simulación. Esto se evidencia en que para ninguna demora de respuesta (lag) hay algún valor del coeficiente de correlación que salga por fuera de la banda del 95% de confianza (en verde en la figura 3.7).

En contrapartida, el correlograma de la población (en rojo) exhibe autocorrelación temporal que alcanza significación estadística hasta para demoras de respuesta (lag) de tres unidades de tiempo. Más importante aún es el hecho de que la correlación misma muestra un patrón oscilante bastante más ordenado que la evolución de la correlación de la precipitación, evolución carente de patrón.

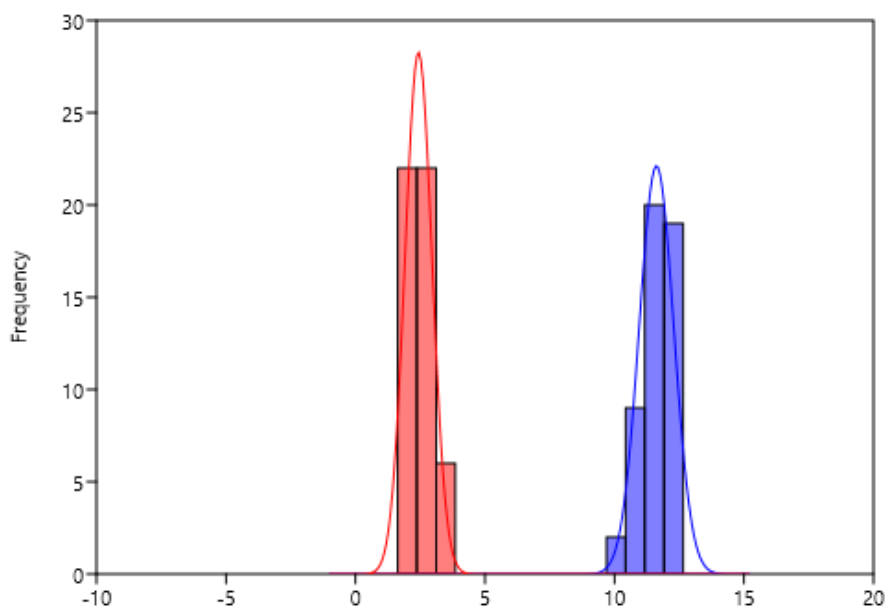


FIGURA 3.6. HISTOGRAMAS DE LA VARIABILIDAD (%) DE LA PRECIPITACIÓN, EN AZUL – EXPRESIÓN DE LAS PERTURBACIONES SOBRE LA POBLACIÓN – Y LA VARIABILIDAD DEL SISTEMA POBLACIONAL, EN ROJO. SE MUESTRA EL EFECTO AMORTIGUADOR DE LA POBLACIÓN SOBRE LAS PERTURBACIONES QUE RECIBE.

Ahora bien, ¿qué sucedería si el sistema fuese más fuertemente no lineal? Antes (figura 3.2) se había visto que un incremento de la no linealidad de la mortalidad de adultos era capaz de inducir una oscilación constante en la población a pesar de que la precipitación se mantenía constante. ¿Se repetirá este comportamiento frente a una precipitación aleatoria como la que estamos evaluando?

El mismo procedimiento que se usó en la sección 3.1 para pasar a una mortalidad de adultos más fuertemente no lineal, se ha empleado en el presente caso. Se ha reemplazado la ecuación:

$$\text{MORTAD } t = 0.1949 - 0.0858 \ln \text{DISPAST } t-3 \quad \text{por la ecuación}$$

$$\text{MORTAD } t = 0.1949 - 0.858 \ln \text{DISPAST } t-3.$$

Con esta nueva ecuación se han corrido 30 simulaciones de PP aleatoriamente generada (ruido blanco) y la forma en que el sistema poblacional se ha comportado en respuesta. Los correspondientes coeficientes de variación (CV) de cada una de las 30 series tanto para la precipitación como para la población se muestran en el diagrama de dispersión de la figura 3.8.

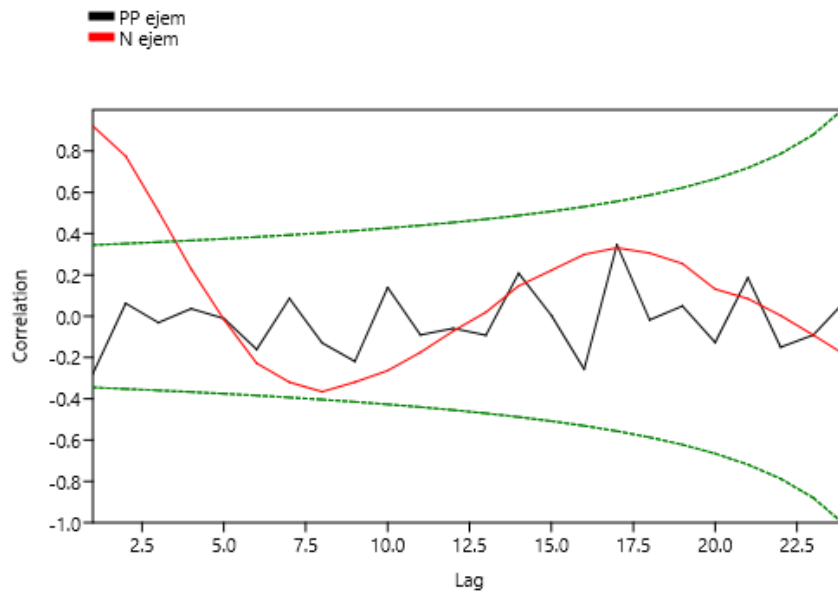


FIGURA 3.7 CORRELOGRAMAS PARA UNA SERIE DE PRECIPITACIÓN (NEGRO) Y PARA LA RESPUESTA QUE FRENTE A ESA SERIE TIENE LA POBLACIÓN (ROJO). LA BANDA CONTENIDA ENTRE AMBAS LÍNEAS VERDES REPRESENTA LA FRANJA DEL 95% DE CONFIANZA.

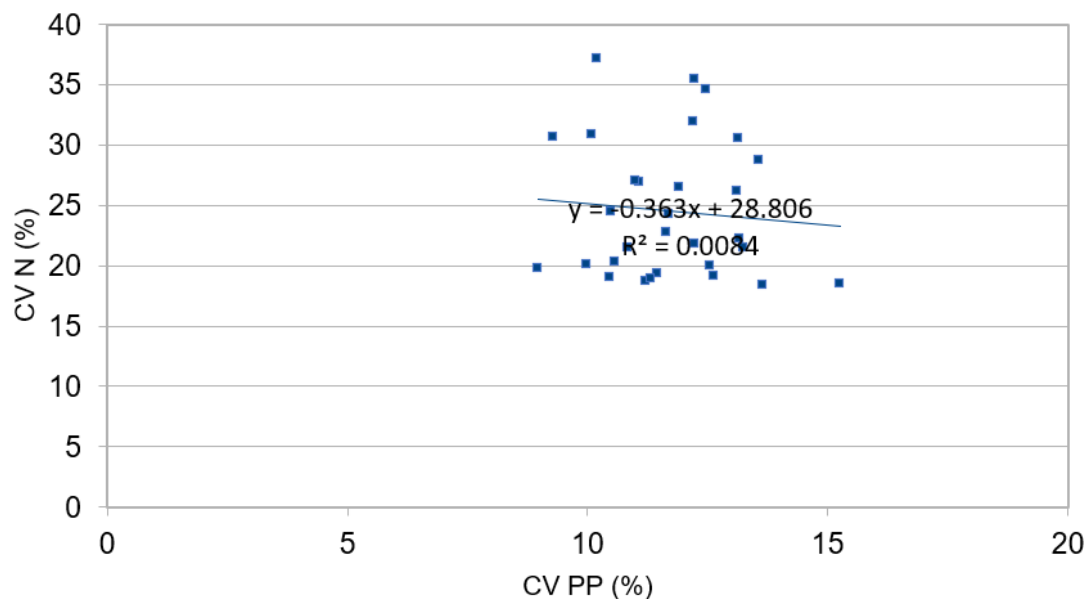
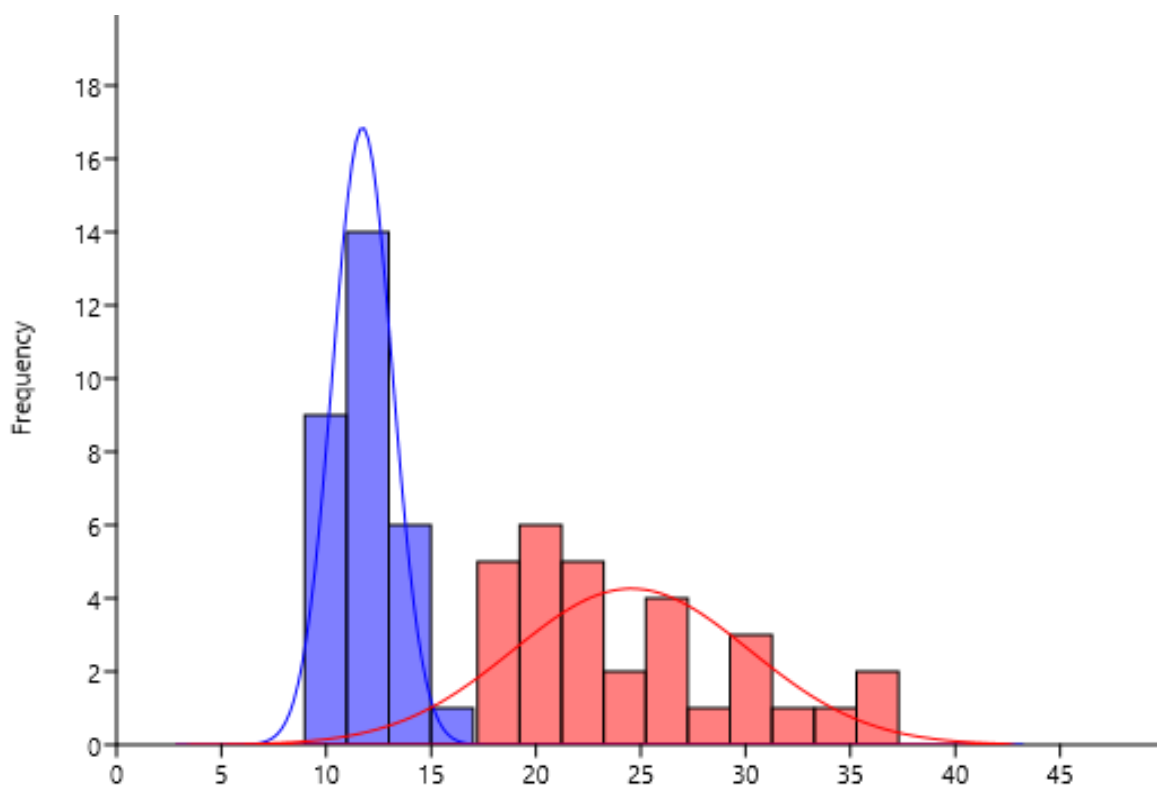


FIGURA 3.8 COEFICIENTES DE VARIACIÓN PARA 30 SIMULACIONES DE PRECIPITACIÓN (CV PP) Y LOS CORRESPONDIENTES COEFICIENTES DE VARIACIÓN DE LA POBLACIÓN (CV N) EN RESPUESTA.

El diagrama de dispersión de la figura 3.8 está mostrando la misma carencia de relación estadísticamente significativa entre los CV de la precipitación y del sistema poblacional que ya se había visto con una relación no tan fuertemente no lineal (figura 3.5). También en este caso se está frente a un sistema poblacional que no es un mero transmisor de las perturbaciones que recibe. Si así fuera debería suceder que mientras mayor sea la magnitud de las perturbaciones sobre el sistema poblacional, éste debería tener respuestas mayores también.

Una peculiaridad que ha surgido con este sistema más fuertemente no lineal tiene que ver con la magnitud de las variaciones de la población (CV N). En este caso la variabilidad de la población resulta siendo mayor que la de la precipitación, tal como se ve en la figura 3.9. En efecto, en este caso el histograma de los CV de la población (rojo) se ubica a la derecha del histograma de los CV de la precipitación (azul); la mediana de los CV de la población (me = 22.45) es superior a la de los CV de la precipitación (me = 11.67).

De este modo, estos resultados mostrarían que con relaciones más fuertemente no lineales el sistema poblacional estaría comportándose como una especie de amplificador de las perturbaciones que recibe. Al examinar una serie de precipitación escogida al azar de entre las 30 simulaciones y la correspondiente serie poblacional, ambas mediante sus correlogramas, se puede ver (figura 3.10) una correlación inexistente para la precipitación (en negro); esto es lo que corresponde a un ruido blanco, como se había señalado antes. La correlación para la población, en cambio, muestra tanto una autocorrelación temporal para demoras de hasta tres unidades de tiempo y, lo más importante, un patrón sinusoidal muy marcado, con un periodo de alrededor de 11 años y que alcanza significación estadística para demoras de 6, 11, 17 e incluso 22 años. Estas son característica de ruido rojo.



PERTURBACIONES SOBRE LA POBLACIÓN – Y LA VARIABILIDAD (RESPUESTA) DEL SISTEMA POBLACIONAL, EN ROJO.

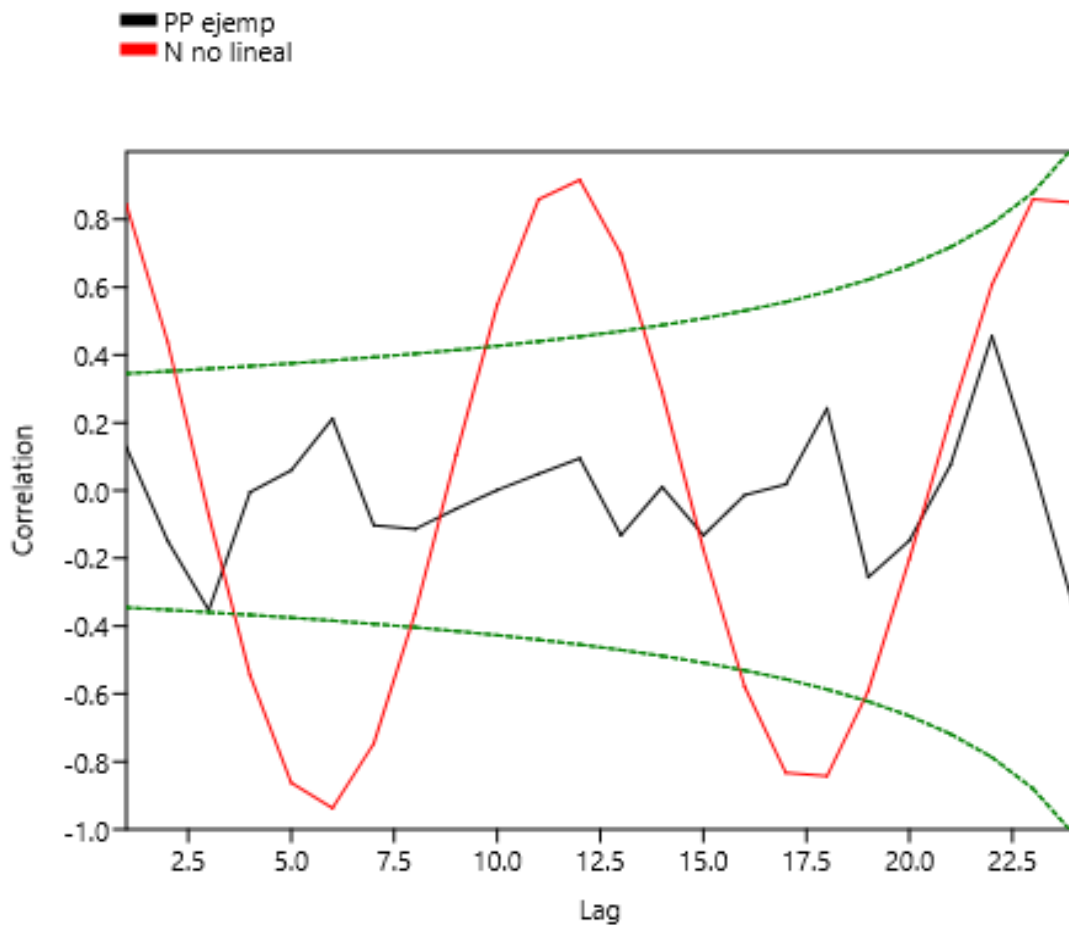


FIGURA 3.10 CORRELOGRAMAS PARA UNA SERIE DE PRECIPITACIÓN (NEGRO) Y LA RESPUESTA POBLACIONAL (ROJO) PARA UN SISTEMA POBLACIONAL FUERTEMENTE NO LINEAL. LA BANDA ENTRE LAS LÍNEAS VERDES CORRESPONDE A LA FRANJA DEL 95% DE CONFIANZA.

De este modo, se está haciendo evidente que la magnitud de la respuesta del sistema poblacional no depende sólo de la magnitud del impacto que recibe ya que en ocasiones puede funcionar como amortiguador de esos impactos y en otras ocasiones puede funcionar como amplificador de las mismas. Por lo que se ha visto, esta capacidad de amplificar o de amortiguar el efecto de los impactos es algo que depende de la estructura interna del sistema, en el ejemplo mostrado, de la magnitud de la no linealidad interactuando con las demoras de respuesta a través de los bucles de retroalimentación existentes. En ambos casos sin embargo, es decir sea que el sistema amplifique o amortigüe los impactos que recibe es notable el hecho de que genera series temporales de ruido rojo a partir del ruido blanco que recibe. Dicho de otro modo, es capaz de hacer surgir patrones definidos – como los ciclos sinusoidales señalados – a partir de series totalmente aleatorias, carentes de patrón.

4. A MODO DE CONCLUSIÓN.

Los resultados que se han mostrado permiten identificar algunas características de las respuestas de los sistemas complejos – como los sistemas ambientales – a las fuerzas externas – por ejemplo los impactos – que sobre ellos operan. Estas características y sus consecuencias para la evaluación ambiental se presentan a continuación.

En principio, los sistemas ambientales no se mueven sólo porque haya una fuerza externa – un impacto – que sobre ellos actúe. Es decir, no son sólo pacientes de estas fuerzas sino que tienen agencia, es decir la capacidad de moverse aún en ausencia de estas fuerzas. De forma que no tiene sentido creer que los cambios en un sistema ambiental son sólo consecuencia de los impactos que recibe. Esto obliga a que en las líneas base de los EIA no sólo sea necesario describir el estado presente del sistema sino más bien su trayectoria, la ruta por la cual el sistema llegó a su estado actual.

Al mismo tiempo, la identificación de trayectorias permite identificar que el sistema ambiental puede tener varios estados alternativos, varios atractores. De este modo, la idea de “equilibrio ambiental” que suele asumir que los sistemas se encuentran en estado estacionario hasta que haya un impacto que los saque de esa condición, dejan de tener sentido.

Dada la complejidad inherente a los sistemas ambientales, sus respuestas a un impacto puntual no serán necesariamente inmediatas y puede haber demoras de respuesta. Al mismo tiempo, el tiempo que le toma al sistema recuperar su estado previo al impacto – su resiliencia – puede demorar más tiempo todavía. Por tanto, la huella de una perturbación puntual puede durar muchos años; 17 años en el presente caso es lo que dura la huella de una sequía puntual.

Además, no suele haber conmensurabilidad entre la magnitud del impacto y la magnitud de la respuesta del sistema, es decir, dado que existen bucles de retroalimentación el sistema puede amplificar o puede amortiguar los impactos que recibe. En adición, no sólo modifica la cantidad de impacto que recibe sino que además modifica su calidad, convirtiendo impactos que se pueden presentar como ruido blanco en respuestas que se manifiestan como ruido rojo.

Esta riqueza de comportamientos lleva a desconfiar de las caracterizaciones de los impactos en base a propiedades como la extensión, la duración, la reversibilidad, la intensidad, y similares, características que se cuantifican en base a escalas arbitrarias y que luego se agregan usando una lógica lineal y aditiva. Esta aproximación además, suele tratar a los impactos individualmente y su agregación se vuelve a hacer con una lógica aditiva.

Proceder así implica desconocer que los comportamientos que han sido descritos son productos emergentes de las interacciones de todos los elementos que forman parte del sistema y los impactos que recibe. Resulta curioso constatar que una herramienta que

ayudaría a superar estas limitaciones y que existe como instrumento hace mucho tiempo no se use en la práctica cotidiana; se trata de los diagramas de interacciones (Espinoza, 2007) los mismos que pueden servir para pasar a modelos gráficos y dinámicos del sistema afectado por los impactos (Biggs et al, 2022). La implementación de esta herramienta y el cambio del modelo mental con el que se hacen los EIA para tomar en cuenta que los sistemas ambientales son sistemas complejos adaptativos, son tareas que se deben acometer.

REFERENCIAS

- Andersen, T., Carstensen, J., Hernández-García, E., & Duarte, C. (2008). Ecological thresholds and regime shifts: Approaches to identification. *Trends in Ecology and Evolution*, 24(1), 49–57.
- Beisner, B. E., Haydon, D. T., & Cuddington, K. (2003). Alternative stable states in ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(7), 376–382.
- Berryman, A., & Kindlmann, P. (2008). *Population systems*. Springer Science + Business Media B.V.
- Biggs, R., de Vos, A., Preiser, R., Clements, H., Maciejewski, K., & Schlüter, M. (Eds.) (2022). *The Routledge handbook of research methods for social-ecological systems*. Routledge.
- Bowd, R., Quinn, N. W., & Kotze, D. C. (2015). Toward an analytical framework for understanding complex social-ecological systems when conducting environmental impact assessments in South Africa. *Ecology and Society*, 20(1), 41. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-07057-200141>.
- Chapin, F. S. III, Kofinas, G. P., & Folke, C. (Eds.) (2009). *Principles of ecosystem stewardship: Resilience-based natural resource management in a changing world*. Springer Science+Business Media, LLC. 10.1007/978-0-387-73033-2.
- Chatfield, C. (1996). *The analysis of time series: An introduction* (5th ed.). Chapman & Hall.
- Cilliers, P., Biggs, H. C., Blignaut, S., Choles, A. G., Hofmeyr, J. S., Jewitt, G. P. W., & Roux, D. J. (2013). Complexity, modeling, and natural resource management. *Ecology and Society*, 18(3), 1. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-05382-180301>.
- Conesa Fernández-Vitoria, V. (2010). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental* (4.ª ed.). Mundi-Prensa.
- Espinoza, G. (2007). *Gestión y fundamentos de evaluación de impacto ambiental*. Banco Interamericano de Desarrollo – BID, Centro De Estudios Para El Desarrollo – CED.
- Groffman, P. M., Baron, J., Blett, T., Gold, A., Goodman, I., Gunderson, L., Levinson, B., Palmer, M., Paerl, H., Peterson, L. P., Rejeski, D., Reynolds, J., Turner, M., Weathers, K., & Wiens, J. (2006). Ecological thresholds: The key to successful environmental management or an important concept with no practical application? *Ecosystems*, 9, 1–13. 10.1007/s10021-003-0142-z.
- Kay, J., & Regier, H. (2000). Uncertainty, complexity and ecological integrity: Insights from an ecosystem approach. En P. Crabbe, A. Holland, L. Ryszkowski, & L. Westra (Eds.).
- Kay, J., Regier, H., Boyle, M., & Francis, G. (1999). An ecosystem approach for sustainability: Addressing the challenge of complexity. *Futures*, 31(7), 721–742.
- Lawrence, D. (2003). *Environmental impact assessment: Practical solutions to recurrent problems*. John Wiley and Sons.
- Ministerio del Ambiente. (2022). *Guía para la identificación y caracterización de impactos ambientales en el marco del SEIA*. Ministerio del Ambiente.
- Pope, J., Bond, A., Morrison-Saunders, A., & Retief, F. (2013). Advancing the theory and

practice of impact assessment: Setting the research agenda. *Environmental Impact Assessment Review*, 41, 1–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2013.01.008>.

- Sánchez, E. (1997). *Variabilidad espacial temporal de una población de vicuñas y modelos para su gestión* (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid.
- Sánchez, E., & Falero, M. (2015). ¿A qué paradigma de gestión de la naturaleza adscribe la normativa peruana sobre calidad ambiental? *Ecología Aplicada*, 14(2).
- Sánchez, E., & Quinteros, Z. (2017). Pertinencia del concepto de estándar de calidad ambiental (ECA) en la gestión de sistemas ambientales con varios estados alternativos. Estudio de caso de una experiencia peruana. *Ecología Aplicada*, 16(2). <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v16i2.1019>.
- Waltner-Toews, D., & Kay, J. (2005). The evolution of an ecosystem approach: The diamond schematic and an adaptive methodology for ecosystem sustainability and health. *Ecology and Society*, 10(1), 38. <http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss1/art38/>.