



# Introducción a la Dinámica de Sistemas

PS-4162 GESTION DE LA PRODUCCION - DECISIONES TACTICAS  
Universidad Simón Bolívar - Departamento de Procesos y Sistemas

Profesor Pedro Celis Caraballo  
Ph.D. ♦ SAFe 5 Agilist ♦ CSPO ♦ SMPC ♦ KanBan Design

*Dirigido a Estudiantes de Ingeniería de Producción*





# Agenda

## Dinámica de Sistemas

- ▶ **Introducción**
- ▶ **Modelos y sus elementos**
- ▶ **Caso de Interés**
- ▶ **Metodología**
- ▶ **Ejemplos concretos**
- ▶ **Pensamiento sistémico**



# Introducción

## Definición I

La Dinámica de Sistemas es una herramienta de simulación matemática para modelar y estudiar el comportamiento de cualquier clase de sistemas y su comportamiento a través del tiempo.

La clave es el modelaje de los retardos y las espirales de realimentación balanceada o reforzada.



# Introducción

## Definición II

La Dinámica de Sistemas estudia las características de realimentación de la información en la actividad industrial con el fin de demostrar como la estructura organizativa, la amplificación de políticas, y las demoras en las decisiones y acciones interactúan e influyen en el éxito de la empresa.



# Introducción

## Definición III

**La Dinámica de Sistemas es un método que combina el análisis y la síntesis, suministrando un ejemplo concreto de la disciplina del pensamiento sistémico.**

**Esta suministra un lenguaje que permite expresar las relaciones que se producen en el seno de un sistema y explicar como se genera su particular comportamiento.**



# Introducción

Jay W. Forrester en 1962



- ▶ Desarrolló el primer modelo matemático que representa el funcionamiento del planeta
- ▶ Inventó un lenguaje computacional para correr el modelo
- ▶ Descubrió el origen de los Límites al Crecimiento





# Introducción

## Historia

### Primera Aplicación y publicación:

- ❑ “Industrial Dynamics”. Problema: oscilaciones muy acusadas en las ventas de esta empresa.

### En 1969 se publica la obra:

- ❑ “Dinámica Urbana”

### En 1970 se publica la obra:

- ❑ “El modelo del mundo”, trabajo que sirvió de base para que Donella Meadows realizase “Límites al Crecimiento”



# Introducción

## Los sistemas y su dinámica

- ❑ Modelos mentales - modelos formales - modelos de computadora
- ❑ Modelos de predicción vs. modelos de gestión
- ❑ Modelos estáticos vs. modelos dinámicos
- ❑ ¿Cuál es el objetivo de la dinámica de sistemas?
  - ❖ Comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema
- ❑ Características del Modelado con DS:
  - ❖ Permite comprobar la consistencia de hipótesis y la efectividad de políticas sobre el sistema
  - ❖ Capacidad de describir el comportamiento a largo plazo
  - ❖ Se enfoca en los objetos y sus relaciones (estructura)





# Introducción

## Los sistemas y su dinámica

- ❑ Paralelismo entre los sistemas dinámicos y uno hidrodinámico (depósitos, canales, retardos, flujos, fenómenos exógenos)
- ❑ La dinámica de sistemas, permite en estos días ir más allá de los estudios de casos y las teorías descriptivas
- ❑ La dinámica de sistemas permite modelar sistemas lineales y no-lineales
- ❑ Combinados con las computadoras, los modelos de dinámica de sistemas permiten una simulación eficaz de sistemas complejos



# Introducción

## Los sistemas y su dinámica

- La DS es una combinación de:
  - ❖ Técnicas Tradicionales de Gestión de Sistemas (Intuición, experiencia, información y heurística)
  - ❖ Teoría de Sistemas retroalimentados
  - ❖ Simulación por Computador
- La Dinámica de sistemas estudia fundamentalmente, los aspectos que no son fáciles de interpretar y se basan en los bucles de realimentación



# Introducción

## Campos de Aplicación

En sistemas sociológicos ha encontrado multitud de aplicaciones, desde aspectos más bien teóricos como la dinámica social de Pareto o de Marx, cuestiones de implantación de justicia

Un área en la que se han desarrollado importantes aplicaciones es la de los sistemas ecológicos y medioambientales, en donde se han estudiado, tanto problemas de dinámica de poblaciones, como de difusión de la contaminación

Sistemas energéticos, en donde se ha empleado para definir estrategias de empleo de los recursos energéticos

Se ha empleado también para problemas de defensa, simulando problemas logísticos de evolución de tropas y otros problemas análogos



# Modelos y sus Elementos

## Diferencias conceptuales

### Modelo:

- ❑ Representación abstracta de un aspecto de la realidad que simplifica y cuantifica. Conformado por elementos que caracterizan la realidad modelada y sus relaciones. Simula el comportamiento en el tiempo para obtener un sistema dinámico

### Modelo Mental:

- ❑ Estructura y Relaciones versus Explícito y Proyección

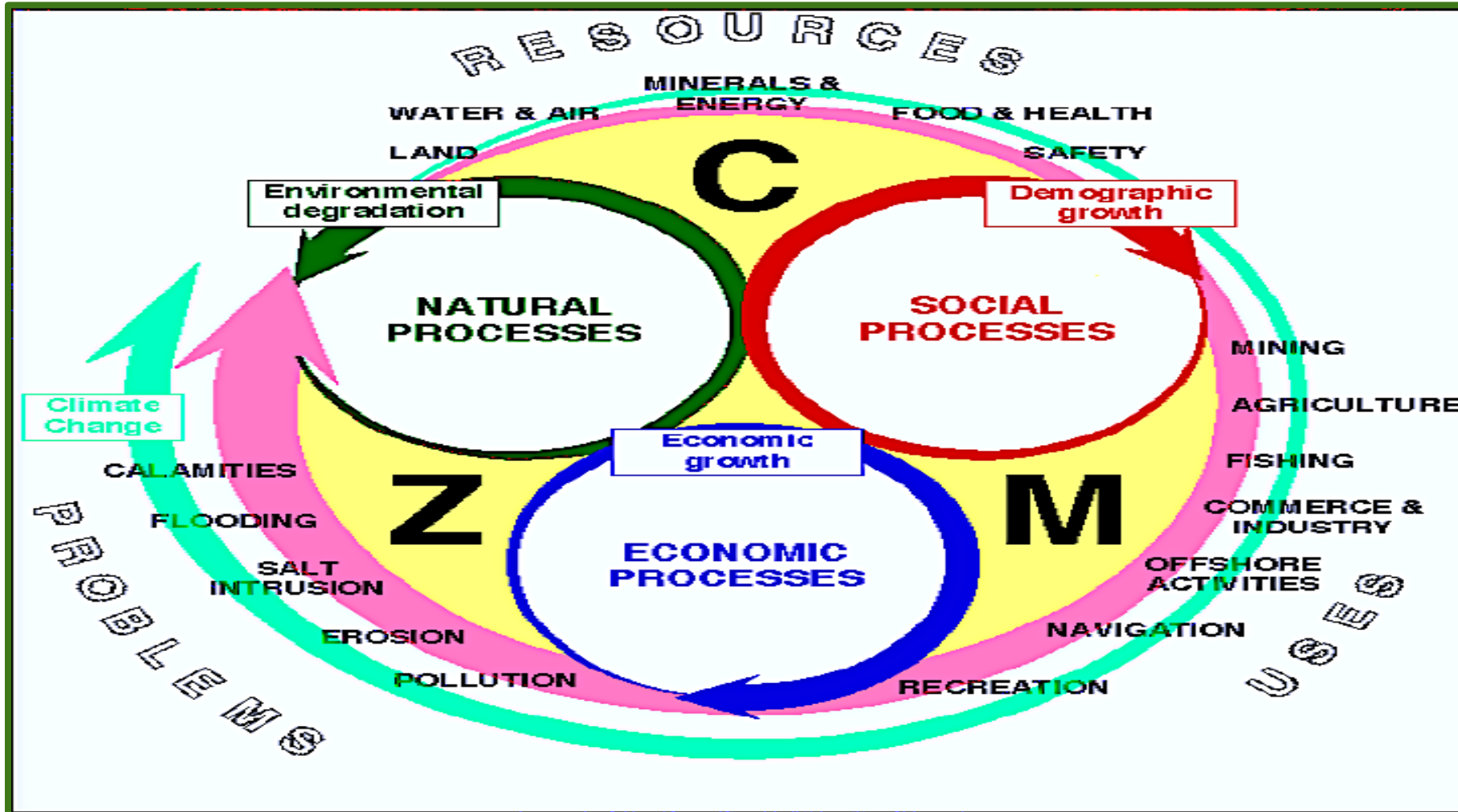
### Simulación:

- ❑ Sistema real para aprender su comportamiento y evaluar diversas estrategias de intervención



# Modelos y sus Elementos

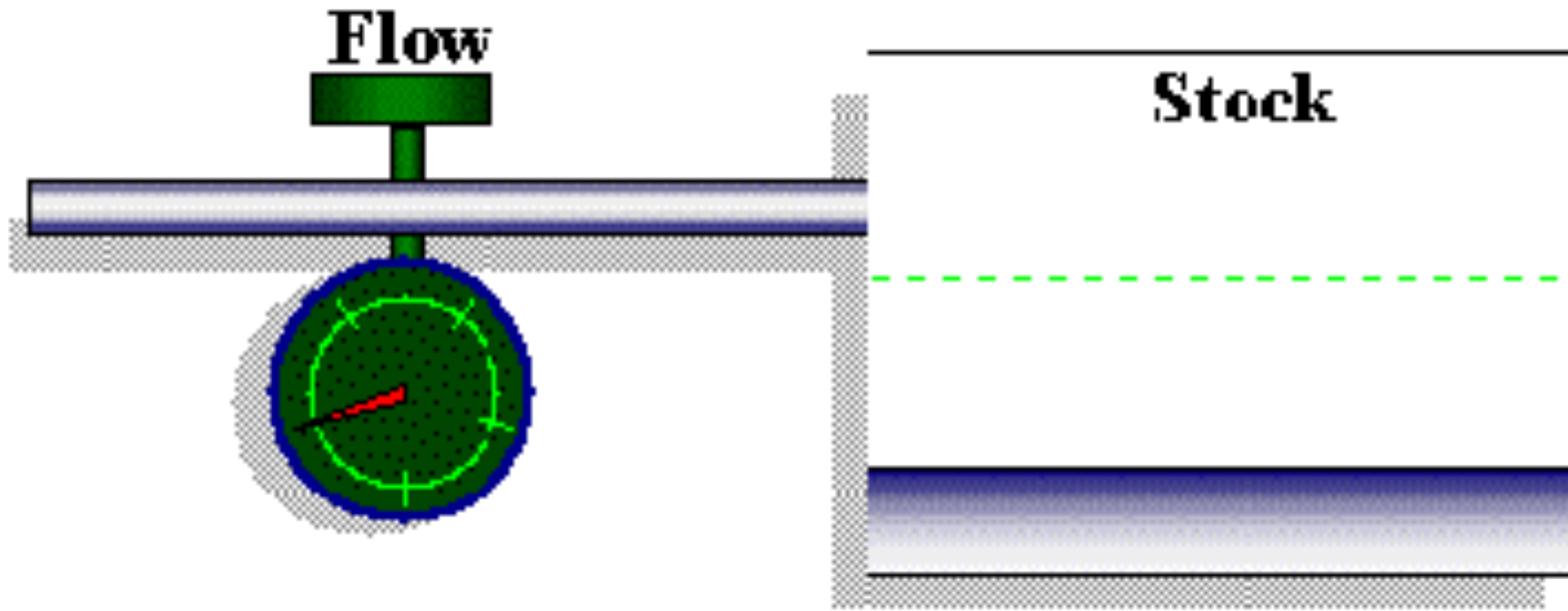
## Tipos





# Modelos y sus Elementos

## Evento continuo



La simulación continua es análoga a un depósito en donde el fluido que atraviesa una cañería es constante. El nivel puede aumentar o puede disminuir, pero el flujo es continuo. En modelos continuos, el cambio de valores se basa directamente en los cambios de tiempo.



# Modelos y sus Elementos

## Evento discreto



Una fábrica que ensambla partes es un buen ejemplo de un sistema de evento discreto. Las entidades individuales (partes) son ensambladas basadas en eventos (recibo o anticipación de órdenes)

El tiempo entre los eventos en un modelo de evento discreto raramente es uniforme

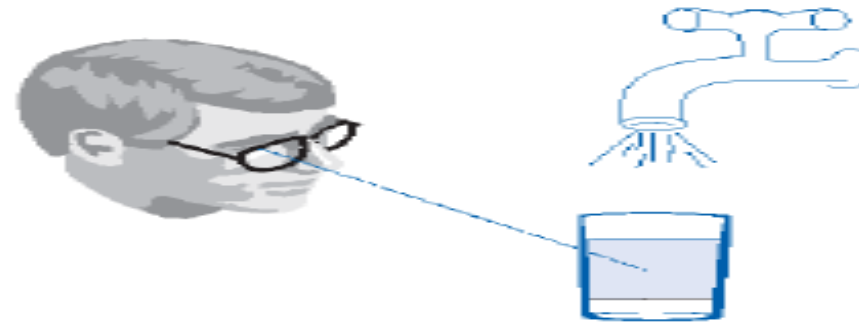
Se puede modelar con Dinámica de Sistemas al hacer los flujos variables con variables exógenas y realimentados con los mismos niveles que produce



# Modelos y sus Elementos

## Espirales de Retroalimentación

- ▶ Conjunto de Variables
- ▶ Relaciones entre Variables
- ▶ Bucles de Realimentación



Proceso de llenar un vaso

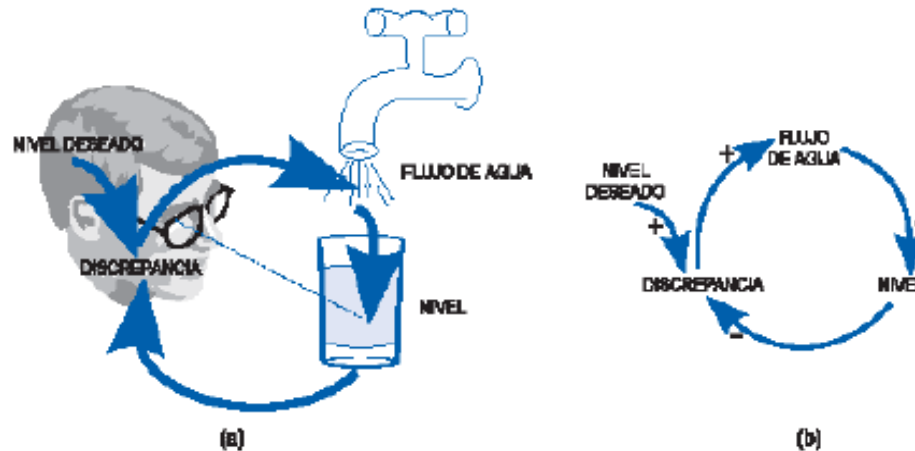


Diagrama con un Grafo orientado / signado





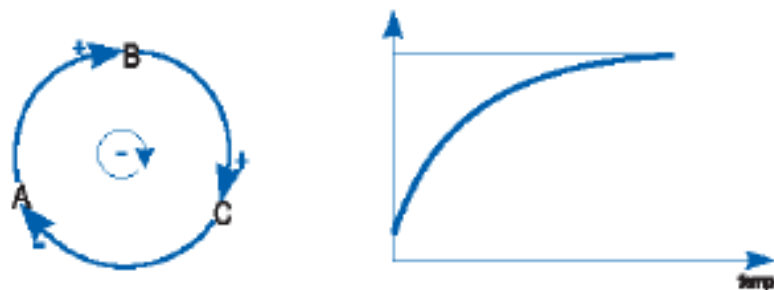
# Modelos y sus Elementos

## Retroalimentación Balanceada



Estructura de retroalimentación balanceada para regular temperatura

- ▶ Estable ante las perturbaciones externas
- ▶ Se realimenta información
- ▶ También se le conoce como retroalimentación negativa



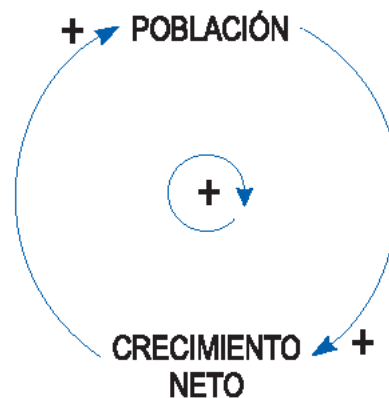
Estructura de retroalimentación balanceada y su comportamiento en el tiempo



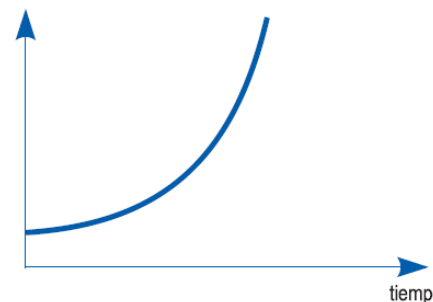
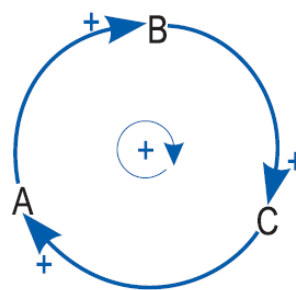
# Modelos y sus Elementos

## Retroalimentación Reforzada

- ▶ Propaga las perturbaciones externas
- ▶ Desestabilizan el Sistema
- ▶ También se le conoce como retroalimentación positiva



Estructura de retroalimentación reforzada representando la explosión demográfica



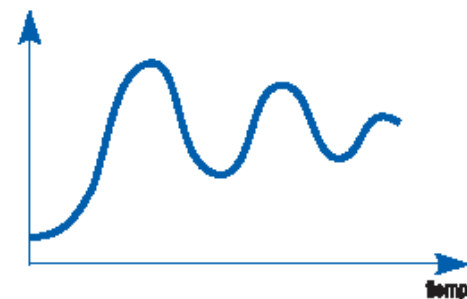
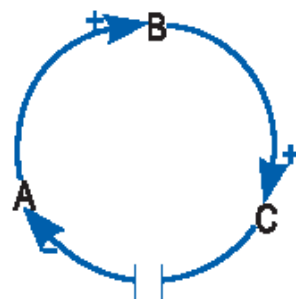
Estructura de retroalimentación reforzada y su comportamiento en el tiempo



# Modelos y sus Elementos

## Retardos o Retrasos (Delays)

- ▶ La retroalimentación reforzada reduce la pendiente con la que se propagan las perturbaciones
- ▶ La retroalimentación balanceada puede producir graves oscilaciones como se ve en la figura



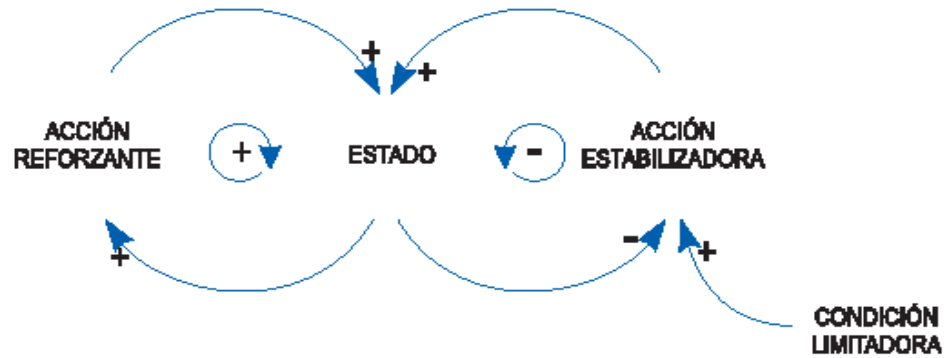
Espiral de retroalimentación balanceada con retraso, y su comportamiento en el tiempo



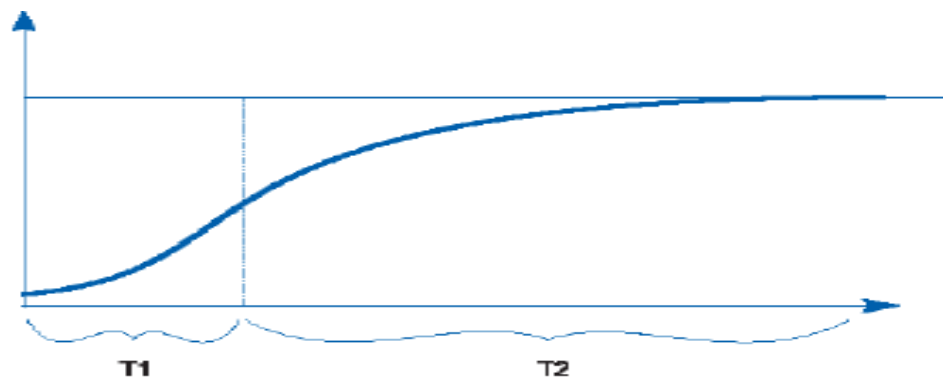
# Modelos y sus Elementos

## Combinaciones

- ▶ La retroalimentación reforzada produce un crecimiento dominante
- ▶ La retroalimentación balanceada produce un efecto limitante
- ▶ Ejemplo: Introducción de un nuevo producto al mercado
- ▶ Ejemplo: Población Nueva en un Lugar
- ▶ Arquetipos Sistémicos o Estructuras Genéricas.



Estructura de 2 espirales: una reforzada y otra balanceada



Comportamiento sigmoial con dos espirales



# Caso de Interés

## La Pandemia del COVID-19

### Identificación del Problema

- ❑ La pandemia del COVID-19 es transmitida por contacto con un individuo enfermo. Se desea saber cual es el comportamiento de la pandemia y que estrategias podrían ser las más adecuadas para enfrentarla

### Hechos

- ❑ El proceso de contagio se relaciona directamente con la tasa de contagio. Mientras mas población infectada, mayor será la tasa de contagio. La población vulnerable es inversamente proporcional a la población infectada. La población infectada es proporcional a la tasa de contagio



# Caso de Interés

## Restricciones epidemiológicas

- ▶ Cuanto más grande la tasa de contagio, mayor es la población infectada
- ▶ Cuanto mayor es la población infectada, más grande será la tasa de contagio
- ▶ Cuanto mayor es la población infectada, menor será la población aún vulnerable
- ▶ Cuanto mayor sea la población vulnerable a la epidemia, mayor será la tasa de contagio

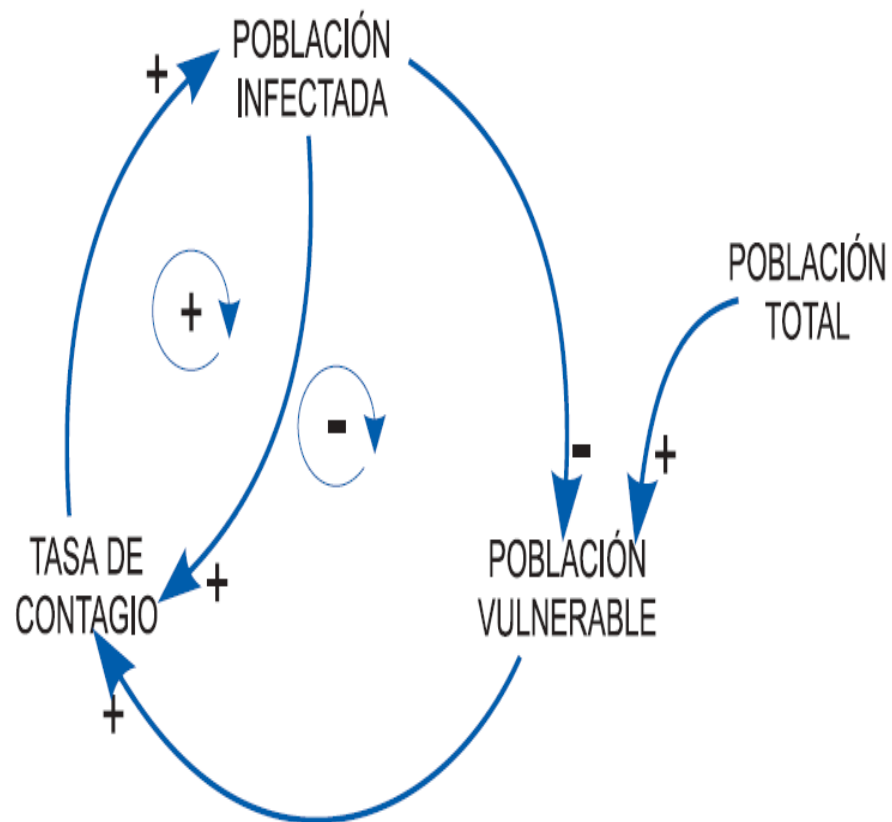
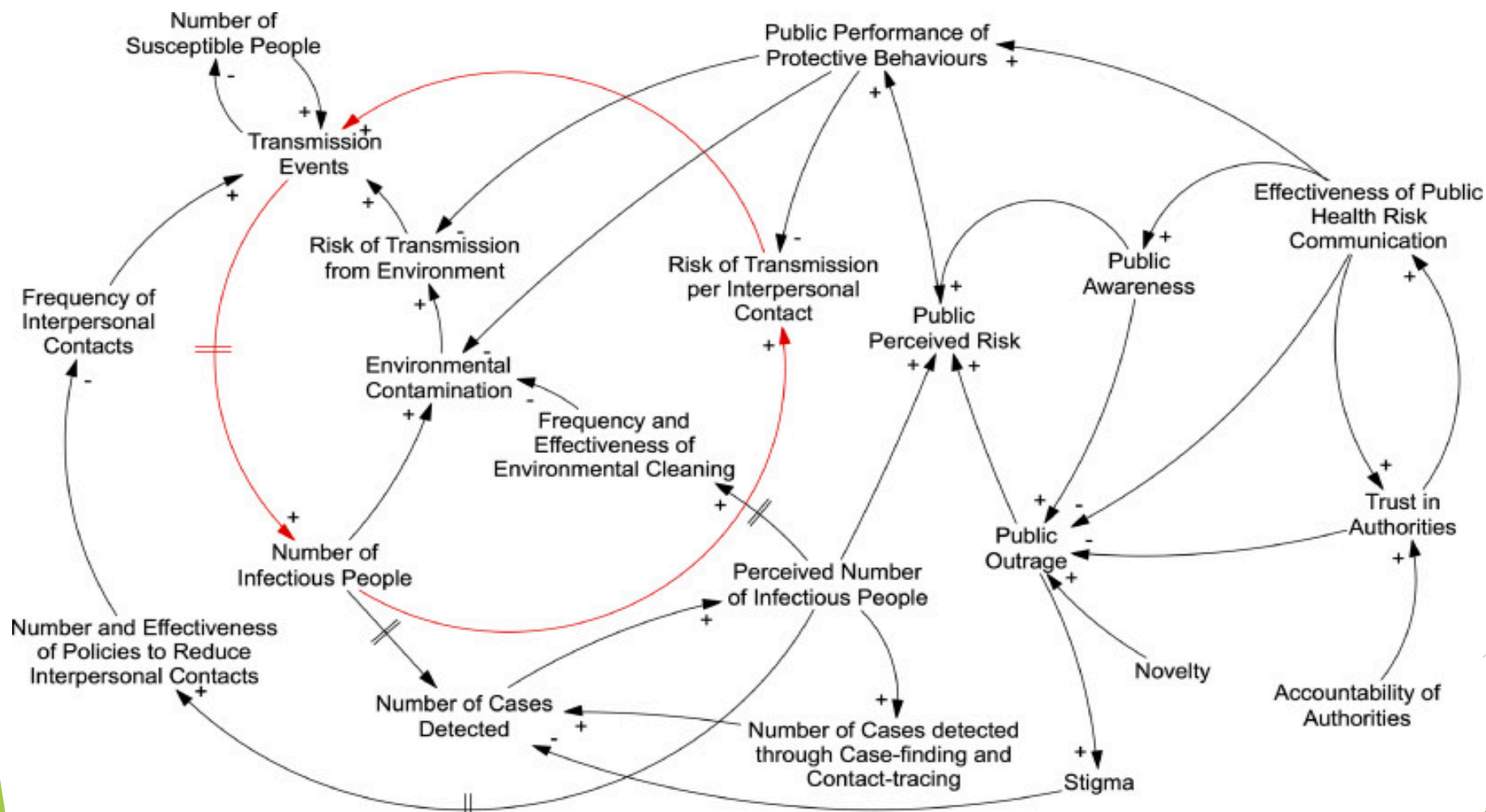


Diagrama de influencias del proceso de propagación de una epidemia



# Caso de Interés

## Diagrama Causa efecto de la Pandemia





# Caso de Interés

## Simulación de la Pandemia

### Coronavirus (COVID-19) Non-Pharmaceutical and Pharmaceutical Interventions

#### Prototype Tool

Disclaimer: This model is a work in progress. It is intended as a comparison tool to understand the impact of different levels of intervention and is not intended to forecast the actual number of infection and fatality.



Go Live

Save

Clear

Select State

Intervention

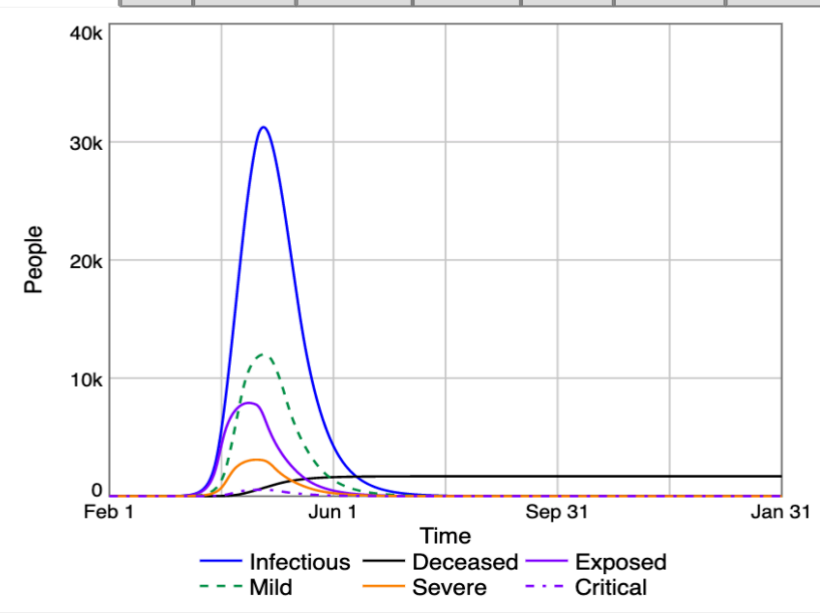
Hospital

Pharmaceutical

Testing

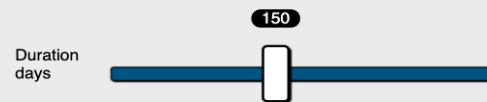
Social Distancing

All Curves Area Infected Providers Bed Use Critical Fatalities Pharma



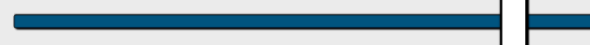
#### Social Distancing

?



Percent of daily contacts reduced

0 = no measures

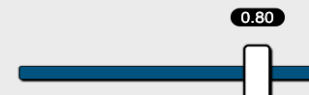


.99 = Stay at home orders

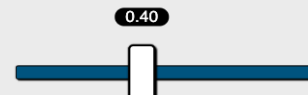
#### Masks and Hygiene

?

Percent of population wearing masks



Percent of population complying to hygiene guidance



#### Capacity

?

Add ICU beds and ventilators



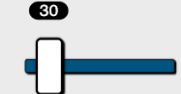
#### Personal Protective Equipment

?

Supply meets need for PPE



Day start



©2020 The MITRE Corporation. ALL RIGHTS RESERVED.  
Approved for Public Release; Distribution Unlimited. Public Release Case Number 20-0919





# Metodología

## Creación de Modelos de Simulación

1. Se observan los modos de comportamiento del sistema real para tratar de identificar los elementos fundamentales
2. Se buscan las estructuras de retroalimentación del sistema
3. Se utilizan herramientas como Stella; iThink; Vensim para modelar matemáticamente en el computador
4. Se realizan las simulaciones del modelo (Modelo de Computador)
5. La estructura obtenida se modifica hasta que sus componentes y el comportamiento resultante coincidan con el observado (real)
6. Se interviene el sistema en puntos clave, gerencialmente factibles, con las decisiones que pueden ser introducidas en el modelo de simulación hasta encontrar aquellas aceptables, positivas y utilizables para un comportamiento real mejorado



# Metodología

## Preguntas Claves

1. ¿Cuál es el problema?
  - ❖ Identificarlo y describir objetivos de estudio con precisión
2. ¿Cuál es el sistema?
  - ❖ Identificarlo. Se deben encontrar los elementos directamente relacionados y los aspectos indirectos
3. ¿Fronteras del Sistema?
  - ❖ Menor número de elementos posible (esenciales y críticos)
  - ❖ Creación mediante aproximaciones sucesivas
  - ❖ Tamaño final debe permitir explicar aspectos esenciales en 10 min
4. ¿Cómo se representa el sistema?
  - ❖ Creación del diagrama causal que recoge elementos clave del sistema y sus espirales de retroalimentación balanceada o reforzada



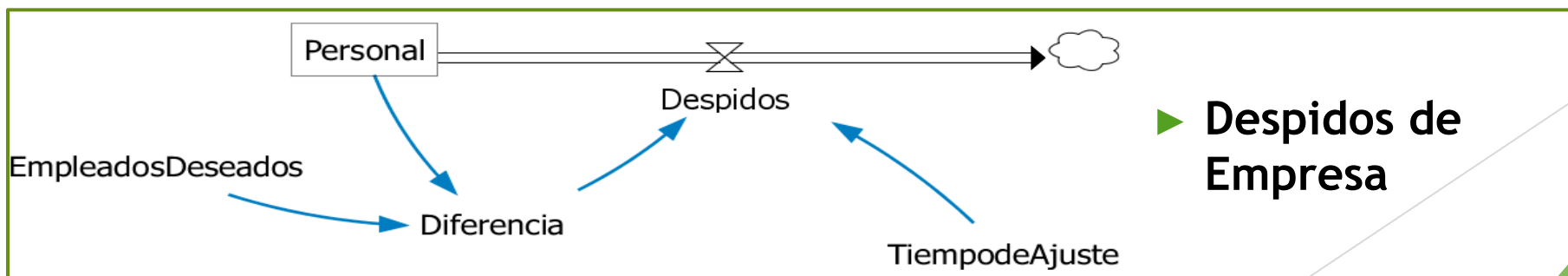
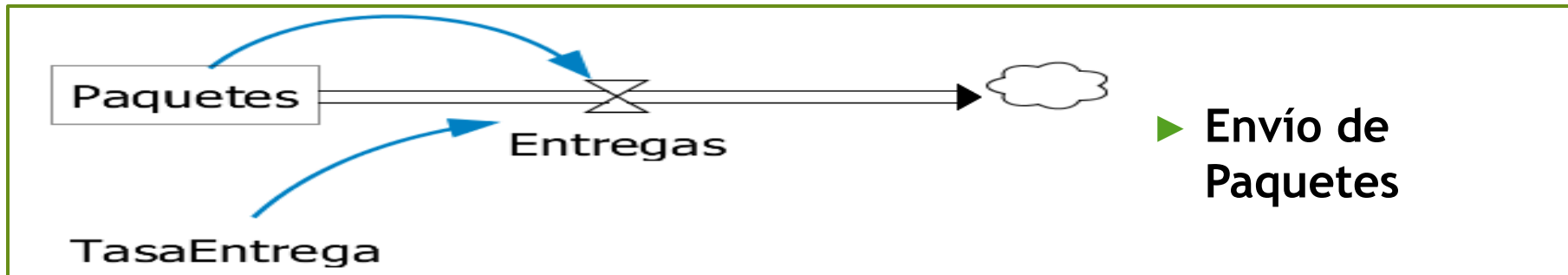
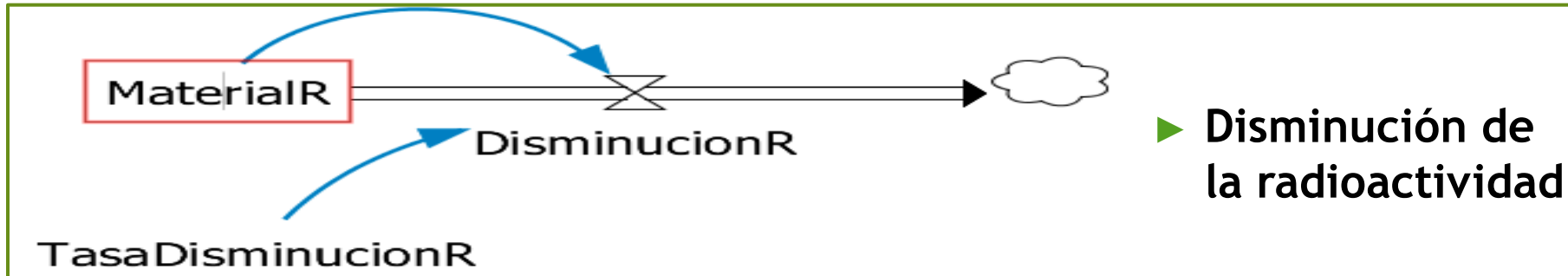
# Metodología

## Preguntas Claves

5. ¿Dónde están los Bucles de Realimentación?
  - ❖ Identificar las cadenas cerradas de relaciones causales
6. ¿Cuál es el factor limitativo?
  - ❖ Es el elemento del sistema que limita el crecimiento del mismo, único en cada momento, pero pueden ser diferentes a lo largo de la simulación.
7. ¿Cuáles son los factores clave?
  - ❖ Existen varios factores clave y no suelen variar a lo largo del tiempo. Su sensibilidad pueden desencadenar comportamientos extremos en el sistema. Identificar los comportamientos contra-intuitivos.
8. ¿Cuál es el tipo de sistema estudiado?
  - ❖ Sistemas estables e inestables, hiperestables, oscilantes, sigmoidales. Uso de patrones.

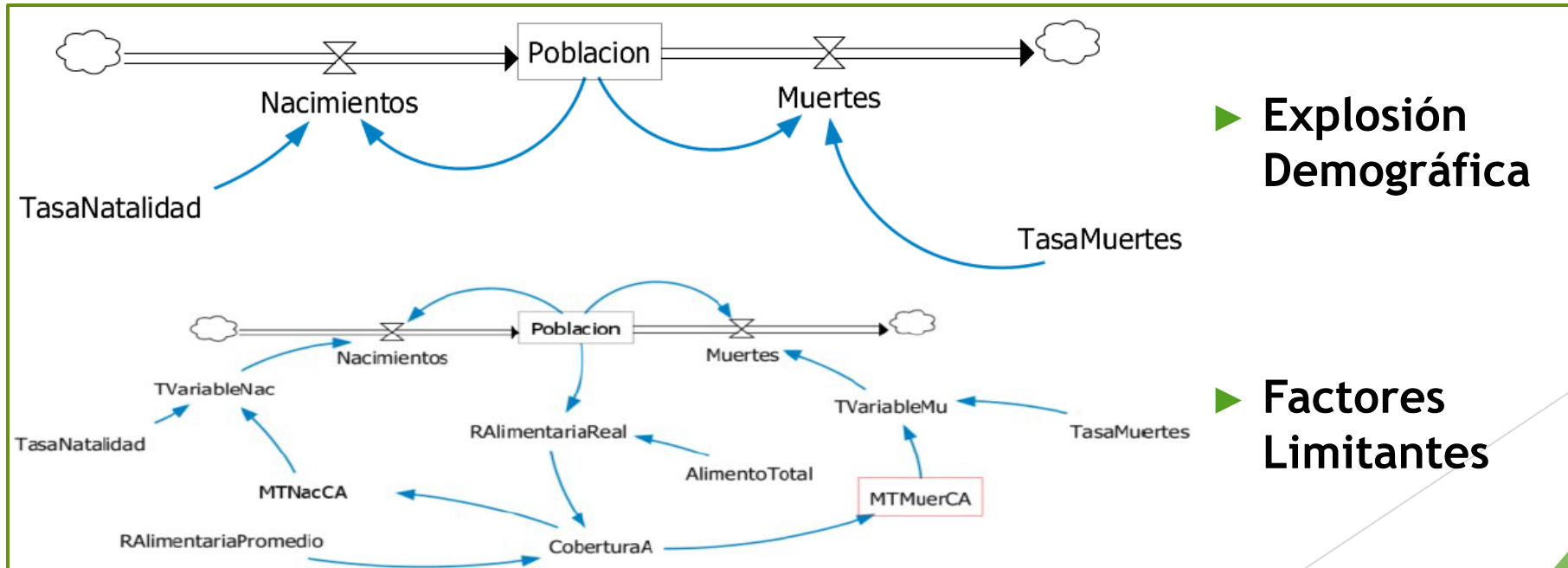
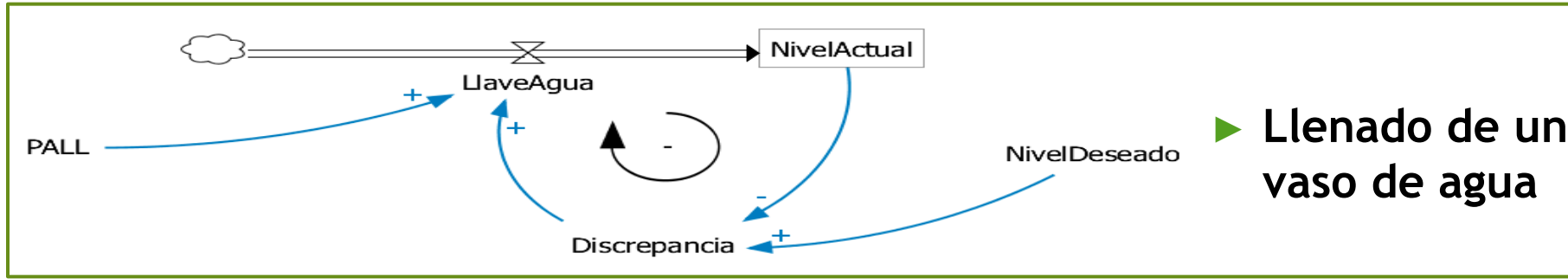


# Ejemplos Concretos





# Ejemplos Concretos





# Pensamiento Sistemico

Revisitando los conceptos de PS-4161



# Lugares para Intervenir

## En orden de impacto

7. **Círculos de retroalimentación reforzada**
8. **Círculos de retroalimentación balanceada. La fuerza de la retroalimentación relativa al impacto**
9. **Demoras o retrasos. Tiempo relativo a la rata de cambio del sistema**
10. **Inventarios y flujos. Estructuras, sistemas físicos y sus nodos de intersección**
11. **El tamaño de los inventarios relativos a los flujos**
12. **Números. Constantes y parámetros**



# Lugares para Intervenir

## En orden de impacto

1. Trascendencia del paradigma. No hay paradigma sino absoluta flexibilidad
2. Paradigmas. La idea compartida detrás del sistema
3. La meta o propósito del sistema
4. Organización propia. Capacidad para añadir, cambiar o evolucionar la estructura del sistema
5. Reglas de juego. Incentivos, castigos y restricciones
6. Flujos de información. El caso de los medidores





# Vivir en un Mundo de Sistemas Ética Sistémica

1. Entender el sistema
2. Sacar a la luz y discutir nuestros propios modelos mentales
3. Honrar, respetar y distribuir la información
4. Usar el lenguaje y enriquecerlo con los conceptos de sistemas
5. Prestar atención a lo importante, no sólo lo cuantificable
6. Haz políticas de retroalimentación para sistemas de retroalimentación
7. Trabaja por el bien del Todo
8. Escucha la sabiduría del sistema
9. Ubica responsabilidad en el sistema
10. Mantente humilde y aprendiendo
11. Celebra la complejidad
12. Expande los horizontes de tiempo
13. Reta a las disciplinas
14. Expande los límites de tus preocupaciones
15. No sacrifiques la meta de bondad