

# Semáforos Auto-organizantes

Carlos Gershenson

IIMAS & C3, UNAM

<http://turing.iimas.unam.mx/~cgg/teach/Pamplona>





# Contenido

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones

- 1 Introducción
  - Movilidad
- 2 Semáforos Auto-organizantes
  - Métodos
  - Simulaciones
  - Beneficios
- 3 Conclusiones



# Predicción vs. Adaptación

- Predicción es útil para espacios de problema “*estacionarios*”.
- Adaptación es útil para espacios de problema “*no estacionarios*”.



- ¿De qué tipo son los espacios de problema urbanos?



# Auto-organización como Método para Construir Sistemas Adaptativos

Cuando se construye un sistema auto-organizante, los elementos son diseñados para que resuelvan de manera *dinámica* y *autónoma* un problema al nivel del sistema.

- Útil cuando la solución no es reducible (interacciones complejas), es desconocida, o cambia constantemente.
  - Problemas de espacio no estacionario.
- Al cambiar el problema, los elementos ajustan su comportamiento, adaptándose a la nueva situación y encontrando soluciones nuevas.





# Ciudades...

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones





# 8 Factores de Movilidad Urbana

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones





# 1. Necesidad

Semáforos Auto-organizantes

Carlos Gershenson

Contenido

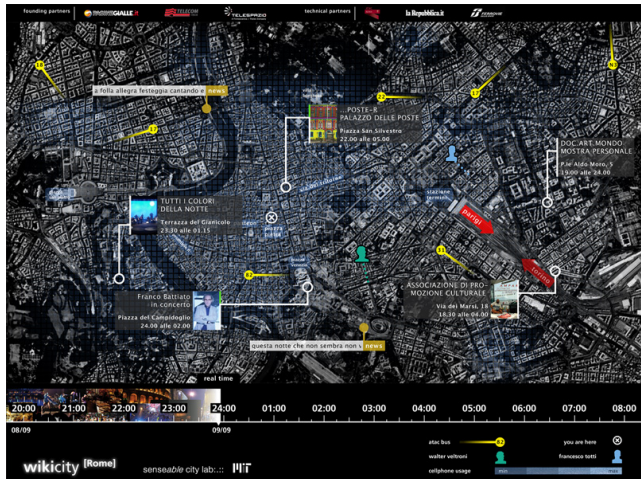
Introducción

Movilidad

Semáforos Auto-organizantes

Métodos Simulaciones Beneficios

Conclusiones





## 2. Distribución de Horarios

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción

Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones







# 3. Cantidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

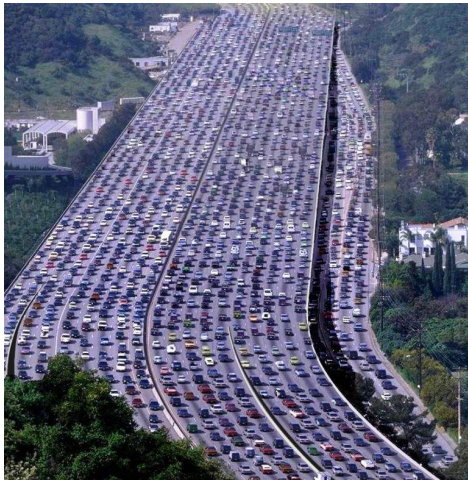
Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones





## 4. Capacidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones





## 5. Comportamiento

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción

Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones





## 6. Infraestructura y Tecnología

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones





# 7. Contagio Social

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción

Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones





## 8. Planeación y Regulación

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción

Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones





# Semáforos Auto-organizantes

## Semáforos Auto-organizantes

Carlos Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos Auto-organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones

- Intersecciones independientes responden al estado de tráfico actual y se coordinan por medio de vehículos para orquestrar un flujo vial eficiente.





# Coordinación de semáforos.

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

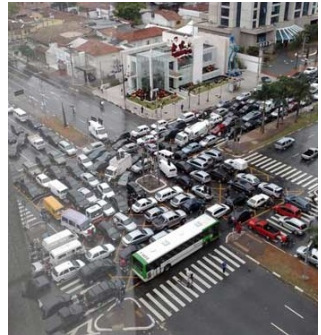
Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones

- La coordinación óptima de semáforos es un problema EXP-completo (intractable).
- Se han usado dos enfoques principales:
- *Optimizar* las fases para un flujo vehicular esperado.
- *Adaptar*—automática o manualmente—las fases dependiendo del flujo actual.
- La situación de tráfico cambia constantemente, es impredecible, i.e. problema de espacio no estacionario.







# El método de *ola verde*

- Si semáforos consecutivos cambian con un desfase (retraso) equivalente al tiempo de viaje esperado de los vehículos entre intersecciones, los vehículos no deberían de pararse.

- Desfases:

$$\omega_j = \text{floor}((x - y) \bmod \frac{T}{2} + 0.5] \quad (1)$$

- Inicializar:

$$\sigma_j = \begin{cases} \text{green}_{\text{vertical}} & \text{if } [((x - y) \bmod T) + 0.5] \geq \frac{T}{2} \\ \text{green}_{\text{horizontal}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones



# El método *auto-organizante* (I)

Semáforos  
Auto-organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción

Movilidad

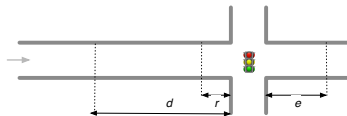
Semáforos  
Auto-organizantes

Métodos

Simulaciones

Beneficios

Conclusiones



- 1 En cada intervalo de tiempo, agregar a un contador el número de vehículos que se acercan a un semáforo en rojo a una distancia  $d$ . Cuando el contador excede un umbral  $n$ , cambio de luces. (Reiniciar contador con cambio de luces.)
- 2 Los semáforos deben de permanecer en verde por un tiempo mínimo  $u$ .
- 3 Si pocos vehículos ( $m$  o menos, peor más de cero) están por cruzar una luz verde a una distancia corta  $r$ , no hacer cambio de luces.



# El método *auto-organizante* (II)

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones

- 4 Si no hay vehículo que se acerque a una luz verde a una distancia  $d$  y por lo menos un vehículo se acerca a la luz roja a una distancia  $d$ , cambio de luces.
- 5 Si hay un vehículo detenido a una distancia corta  $e$  pasando una luz verde, cambio de luces.
- 6 Si hay vehículos detenidos en ambas direcciones a una distancia corta  $e$  pasando la intersección, cambio a ambas en rojo. Cuando una dirección se libere, cambio de luces a verde en esa dirección.



# El Modelo (1)

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

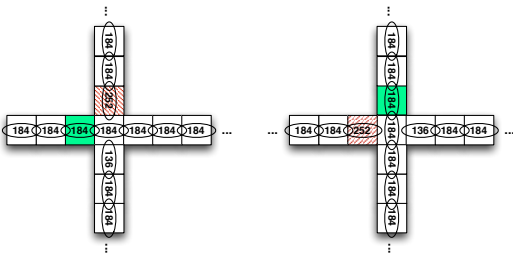
Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones

Table: Reglas de  
ECA

$t - 1$	$t_{184}$	$t_{252}$	$t_{136}$
000	0	0	0
001	0	0	0
010	0	1	0
011	1	1	1
100	1	1	0
101	1	1	0
110	0	1	0
111	1	1	1





# El Modelo (2)

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

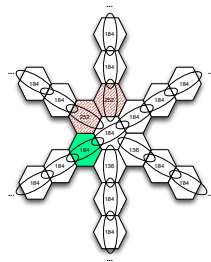
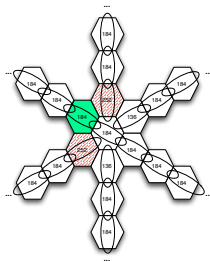
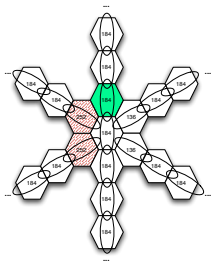
Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones





# Simulación: Malla Rectangular

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

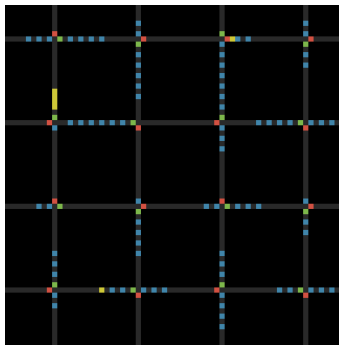
Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones

<http://tinyurl.com/trafficCA>



Rosenblueth, D. A. & C. Gershenson (2011). A model of city traffic based on elementary cellular automata. *Complex Systems*: **19**(4):305-322.



# Resultados: Malla Rectangular

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones

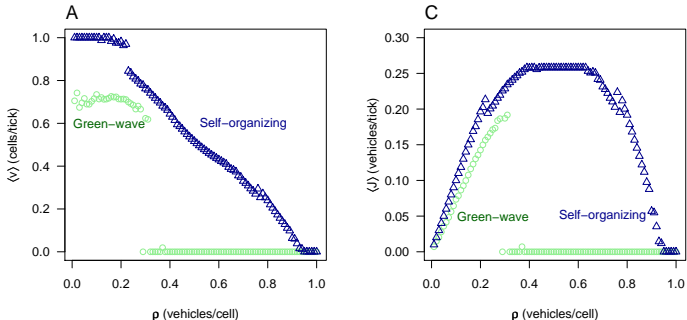


Figure: Resultados para una malla 10x10: (A) velocidad promedio  $\langle v \rangle$  y (C) flujo promedio  $\langle J \rangle$  para distintas densidades  $\rho$ .

Gershenson C. & D. Rosenblueth (In Press). Adaptive self-organization vs. static optimization: A qualitative comparison in traffic light coordination. *Kybernetes*.



# Simulación: Malla Hexagonal

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

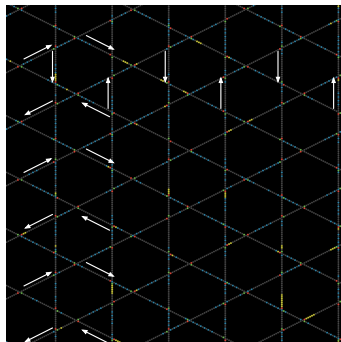
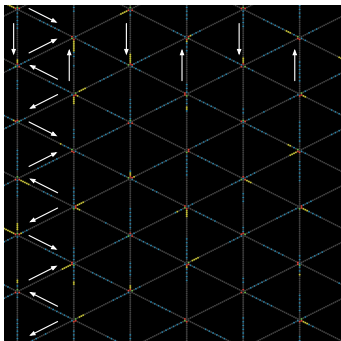
Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones

<http://tinyurl.com/trafficHexCA>



Gershenson, C. & D. A. Rosenblueth (2012). Self-organizing traffic lights at multiple-street intersections. *Complexity* 17(4):23–39.





# Resultados: Malla Hexagonal

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones

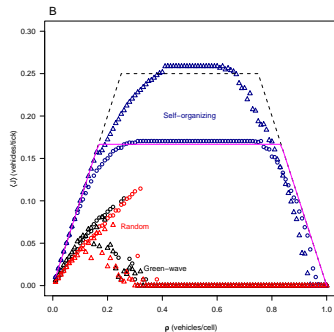
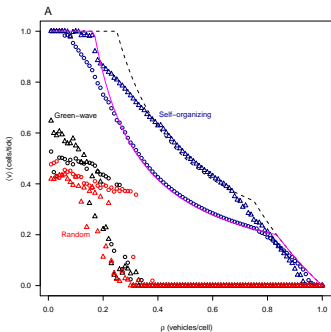


Figure: Resultados para mallas de  $6 \times 6 \times 6$ : (A) velocidad promedio  $\langle v \rangle$  y (C) flujo promedio  $\langle J \rangle$  para distintas densidades  $\rho$ . Se muestran curvas de optimalidad.



# Transiciones de Fase

Semáforos  
Auto-organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones

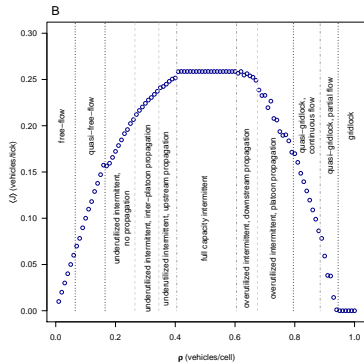
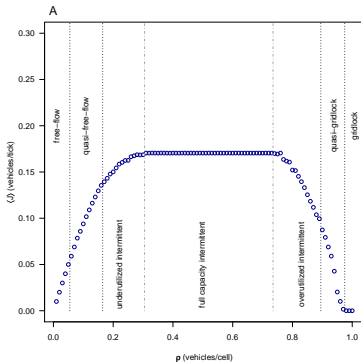


Figure: Fases dinámicas para método auto-organizante: (A) 36 intersecciones triples (B) 108 intersecciones dobles.



# Una Simulación Más Realista

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones

- Simulación de la Wetstraat, Bruselas, Bélgica (Cools, 2006; Cools, Gershenson & D'Hooghe, 2007).
  - <https://sourceforge.net/projects/morevts/>
- Resultados: Los tiempos de espera por viaje promedio (*ATWT*) para las densidades a horas distintas usando SAO fueron de 34% a 64% del *ATWT* de la ola verde. En promedio mejora de 50% (reducción de tiempo de viaje total de 25%)





# Resultados de la Wetstraat

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción

Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones

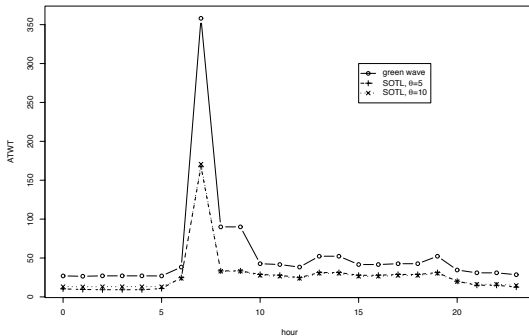


Figure: Tiempos de espera por viaje promedio (ATWT) para distintas horas del día laboral.



# Beneficios Medioambientales

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción

Movilidad

Semáforos

Auto-  
organizantes

Métodos

Simulaciones

Beneficios

Conclusiones

	<b>Ola verde</b>	<b>SAO</b>	<b>Diferencia</b>
ATWT diario (s)	54.63	27.85	26.77
WT diario (hr)	908.61	463.28	445.32
Litros gasolina WT	3089.26	1575.17	1514.09
l/año	1127579.85	574935.97	552643.88
CO <sub>2</sub> tn/año	2706.19	1379.85	1326.35
NO <sub>x</sub> kg/año	9053.41	4616.2	4437.21
CO kg/año	136126.8	69409	66717.79
CxHx kg/año	18237.08	9298.81	8938.27

Emissiones por motores de autos detenidos en la Wetstraat,  
con información de la U.S. EPA.

59877 autos/día. Motor: 3.4 l/hr. 2.4 kg CO<sub>2</sub>/l de gasolina.



# Ventajas adicionales

- Tiempo.
- Seguridad para peatones.
- Cámaras para vigilancia.
- Cámaras para monitoreo de vehículos.
- Implementación paulatina posible, ya ofrece beneficios.
- Innovación a nivel mundial.
- Mejora en calidad de vida.



Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones

Beneficios

Conclusiones



# Costos

- 200,000 pesos por intersección
- 1000 intersecciones D.F. (de 3000)
- 200 millones de pesos.
- 1/15 línea 3 Metrobus o edificio del Senado.
- 1/100 línea 12 Metro .



## Recursos:

- Créditos de carbono por ahorro de gases invernadero.
- Multas automáticas por detección de video.

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones

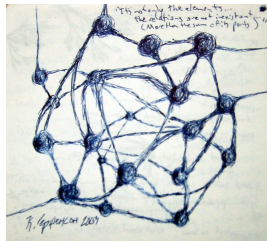
Beneficios

Conclusiones



# Conclusiones

- Auto-organización como método para construir sistemas adaptativos.
- Adaptación mejora eficiencia en problemas de espacio *no estacionario*, e.g. tráfico.
- Método de control de semáforos novedoso, sencillo, viable.
- Gran impacto potencial en la ciudadanía.



Semáforos  
Auto-  
organizantes

Carlos  
Gershenson

Contenido

Introducción  
Movilidad

Semáforos  
Auto-  
organizantes

Métodos  
Simulaciones  
Beneficios

Conclusiones