

BIOELECTRICIDAD

Departamento de Ingeniería Electrónica
Universidad Politécnica de Valencia, España

Prof. José M. Ferrero

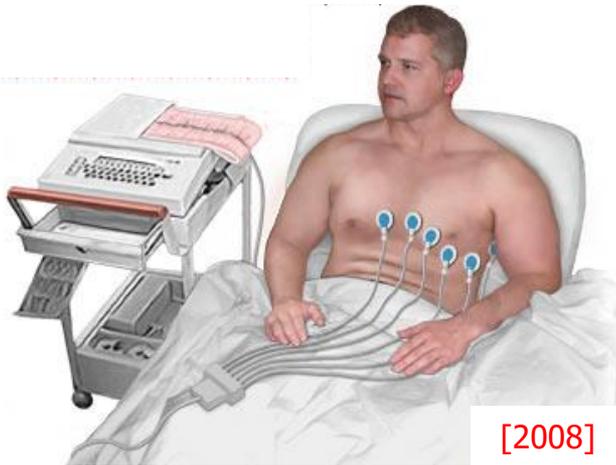


TEMA 2

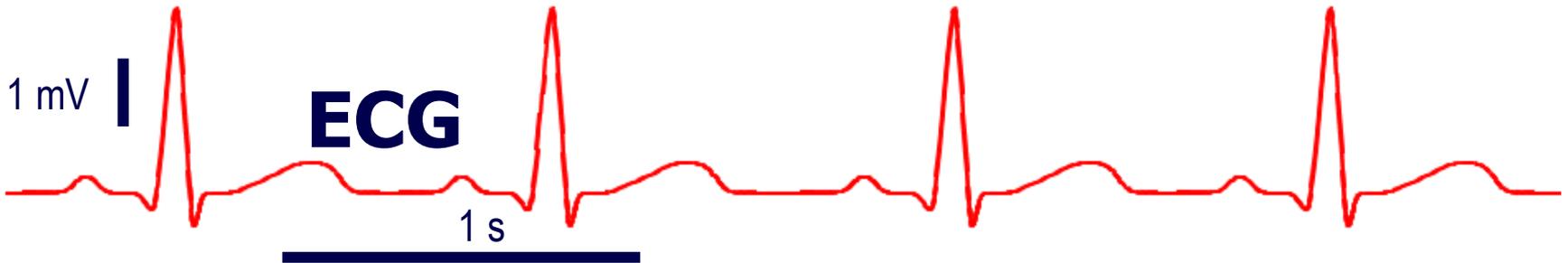
FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE BIOELECTRICIDAD MULTIESCALA

- 2.1.- Naturaleza multiescala de la Bioelectricidad: de lo macro a lo micro
- 2.2.- Diversidad de canales iónicos
- 2.3.- Modelo eléctrico de una célula excitable
- 2.4.- Corrientes iónicas: difusión y campo eléctrico

Naturaleza multiescala de la bioelectricidad



El ECG es el resultado de un proceso **multi escala...**



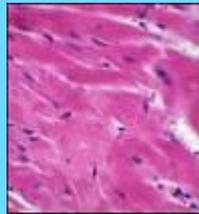
Cuerpo



Órgano



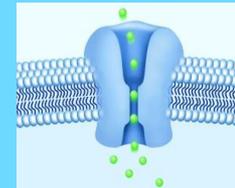
Tejido



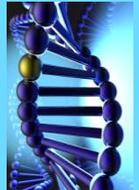
Célula



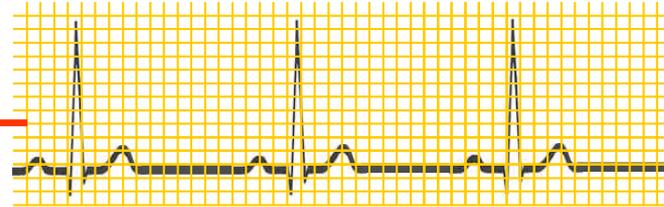
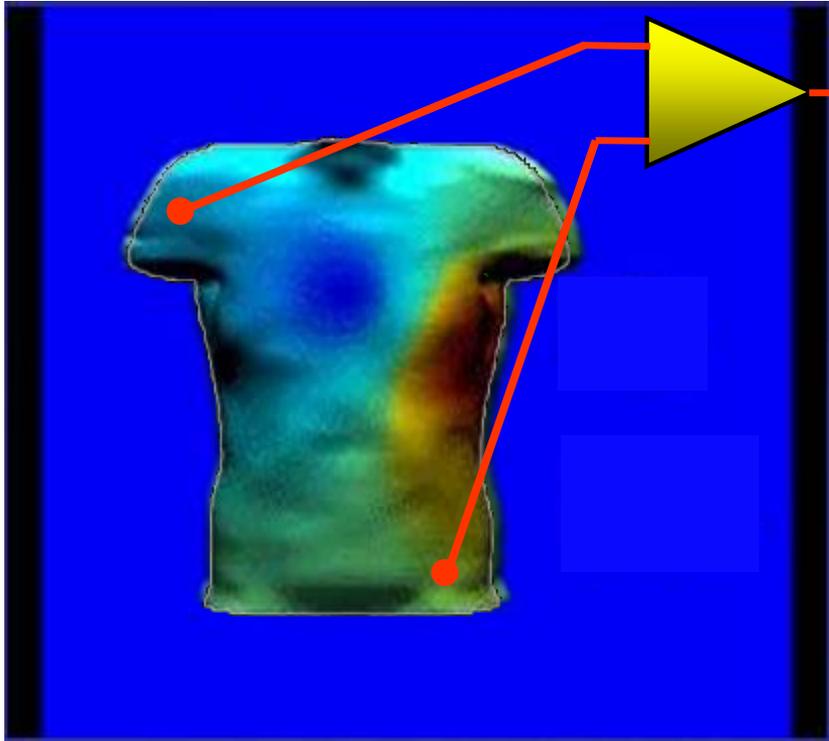
Canal Iónico



Gen



Potenciales de superficie



Cuerpo



Órgano



Tejido



Célula



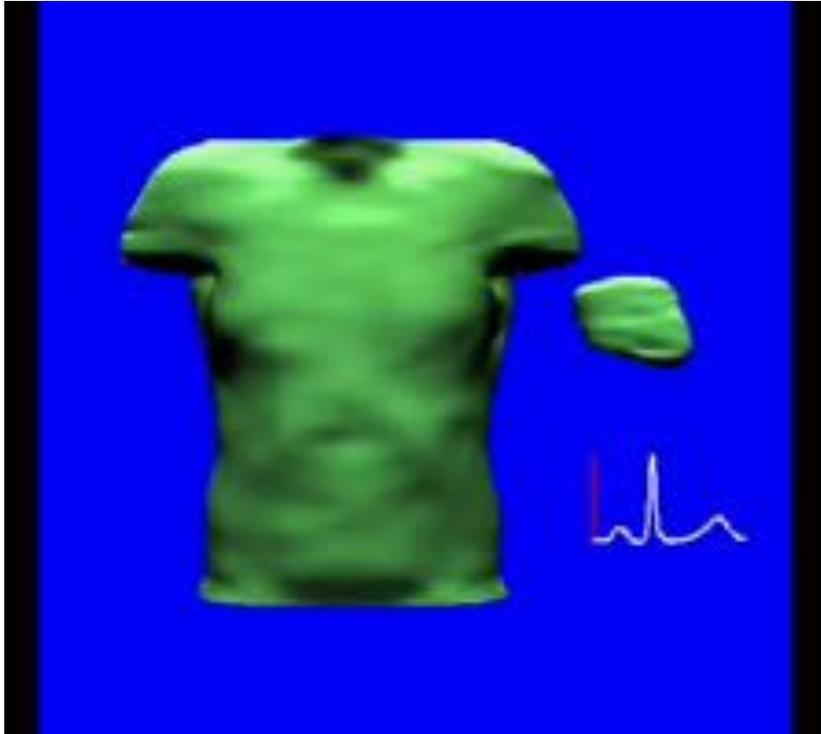
Canal Iónico



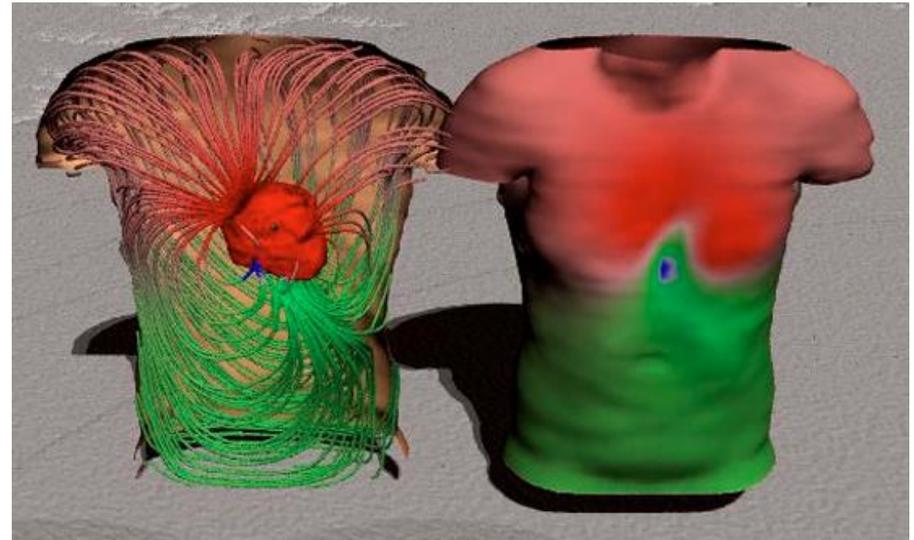
Gen



Potenciales de superficie



[P Hunter et al, 1999]



[C Johnson et al, 1992]

$$V = RI$$

Cuerpo



Órgano



Tejido



Célula



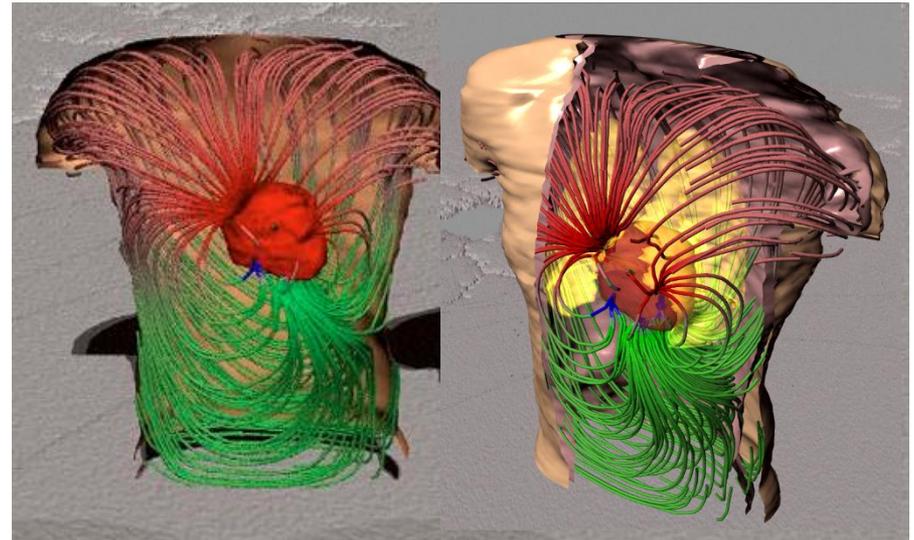
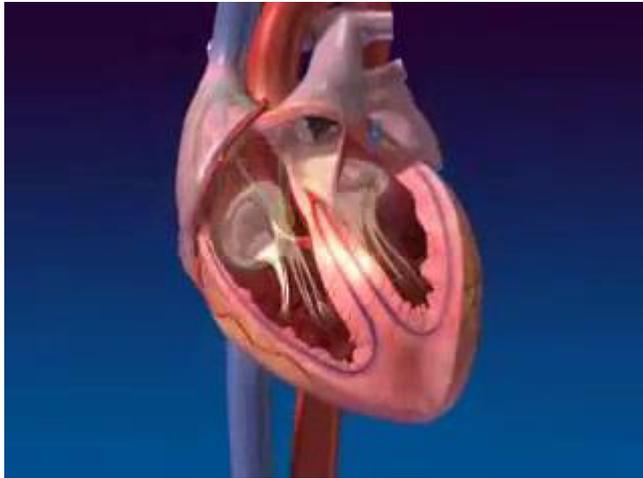
Canal Iónico



Gen



El corazón: bomba mecánica y "dispositivo" eléctrico



[C Johnson et al, 1992]

Cuerpo



Órgano



Tejido



Célula



Canal Iónico

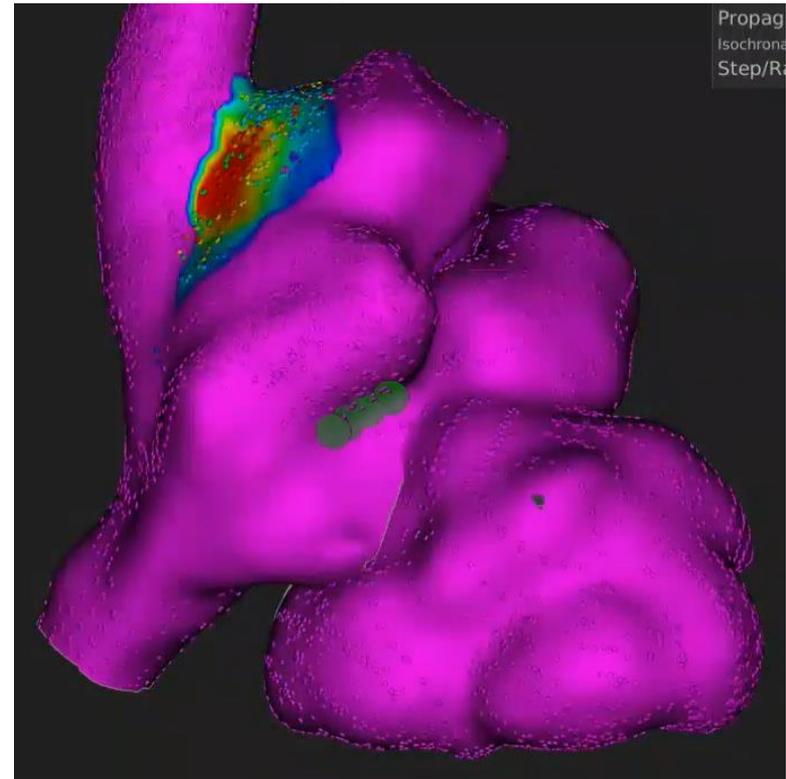
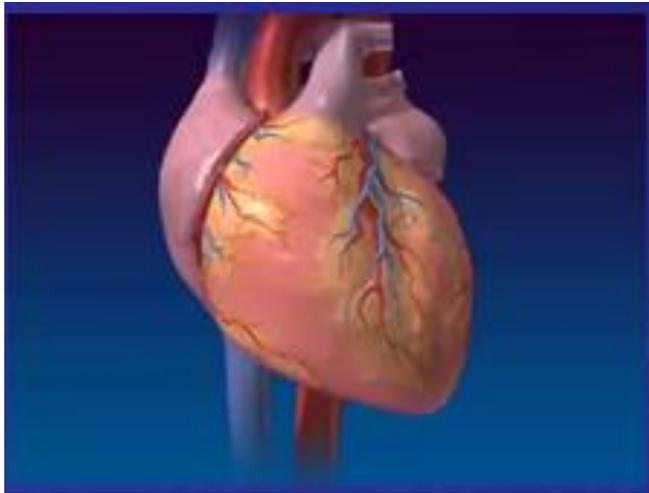


Gen



El corazón: bomba mecánica y "dispositivo" eléctrico

[cortesía del Dr. Ángel Ferrero, Hospital Clínic de Valencia]



Actividad eléctrica del miocardio

Cuerpo



Órgano



Tejido



Célula



Canal Iónico

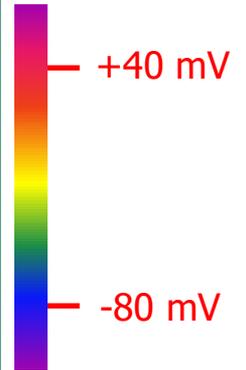
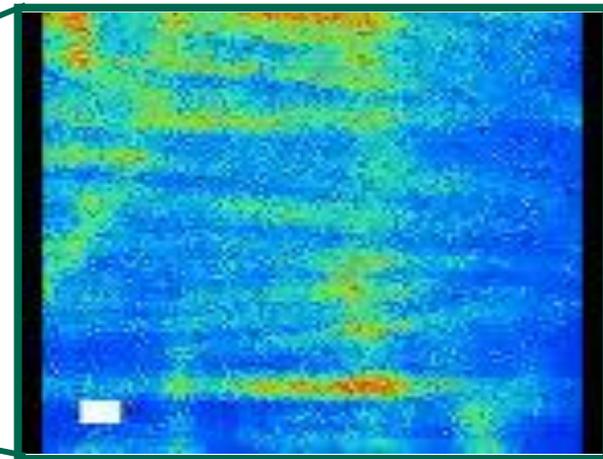
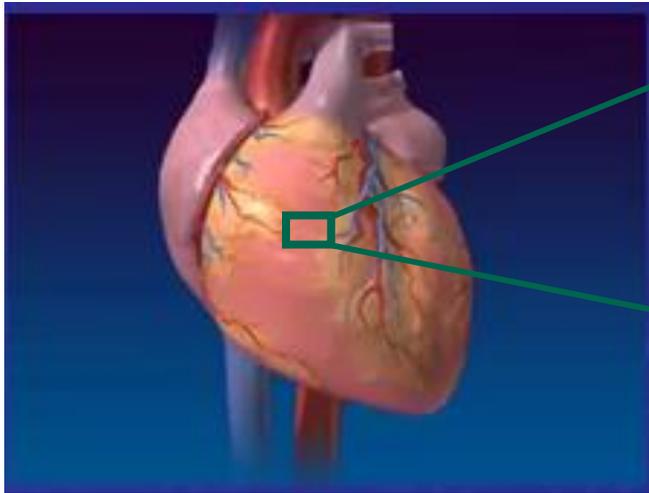


Gen



Actividad eléctrica del tejido cardiaco

(tinte sensible al voltaje)



Actividad eléctrica del miocardio

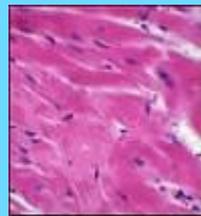
Cuerpo



Órgano



Tejido



Célula



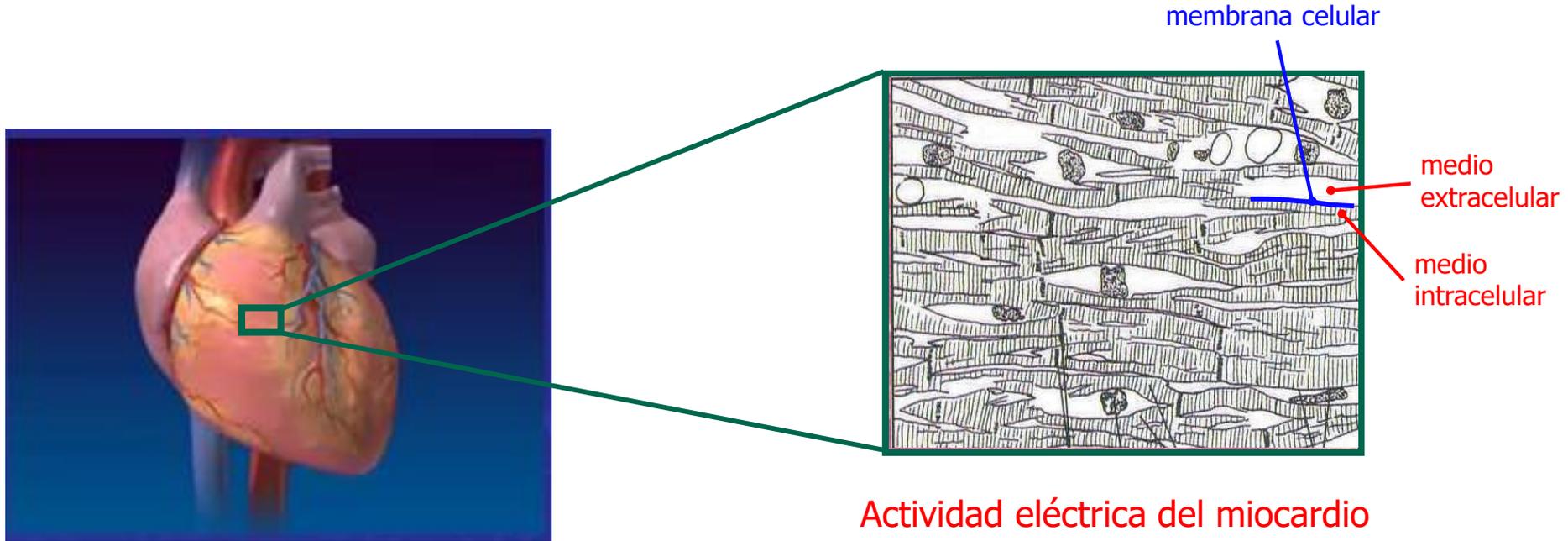
Canal Iónico



Gen



Actividad eléctrica del tejido cardiaco



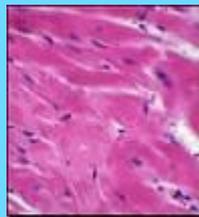
Cuerpo



Órgano



Tejido



Célula



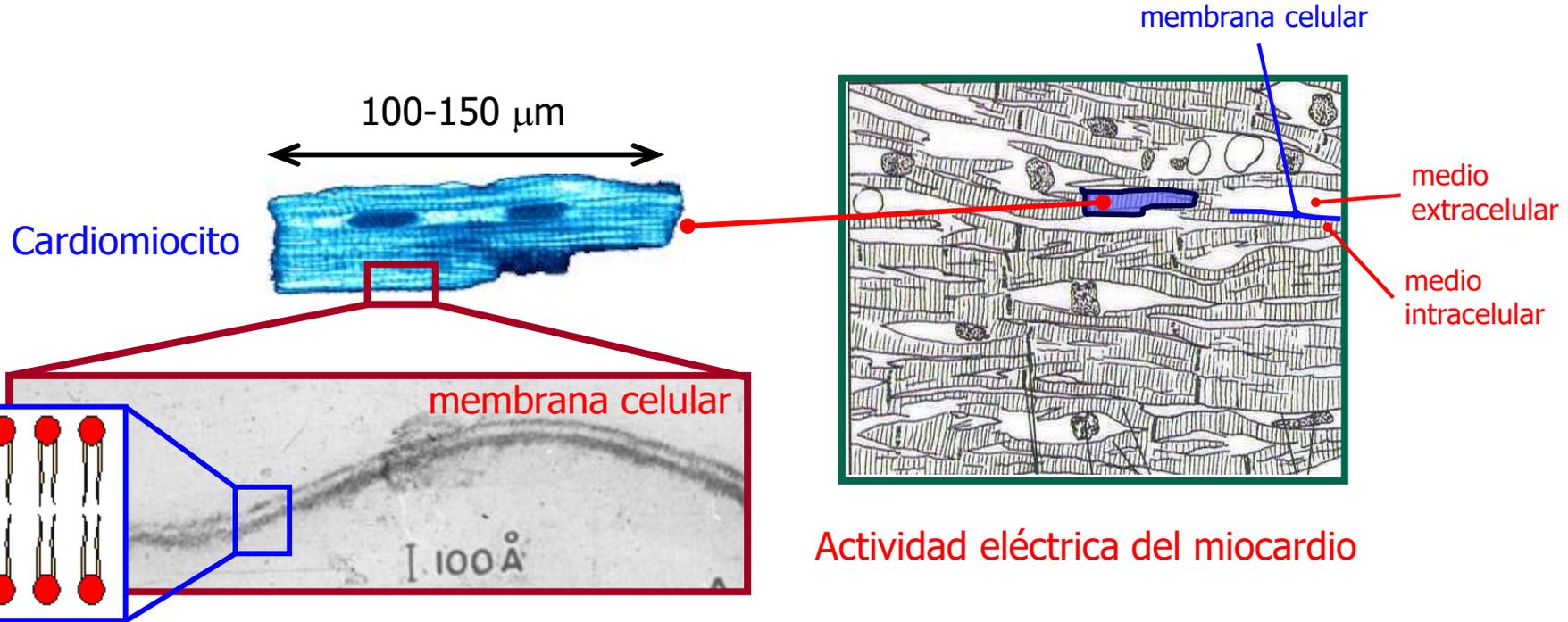
Canal Iónico



Gen



Actividad eléctrica del tejido cardiaco



Cuerpo

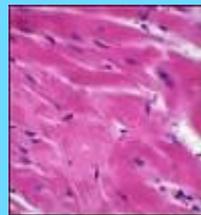
Órgano

Tejido

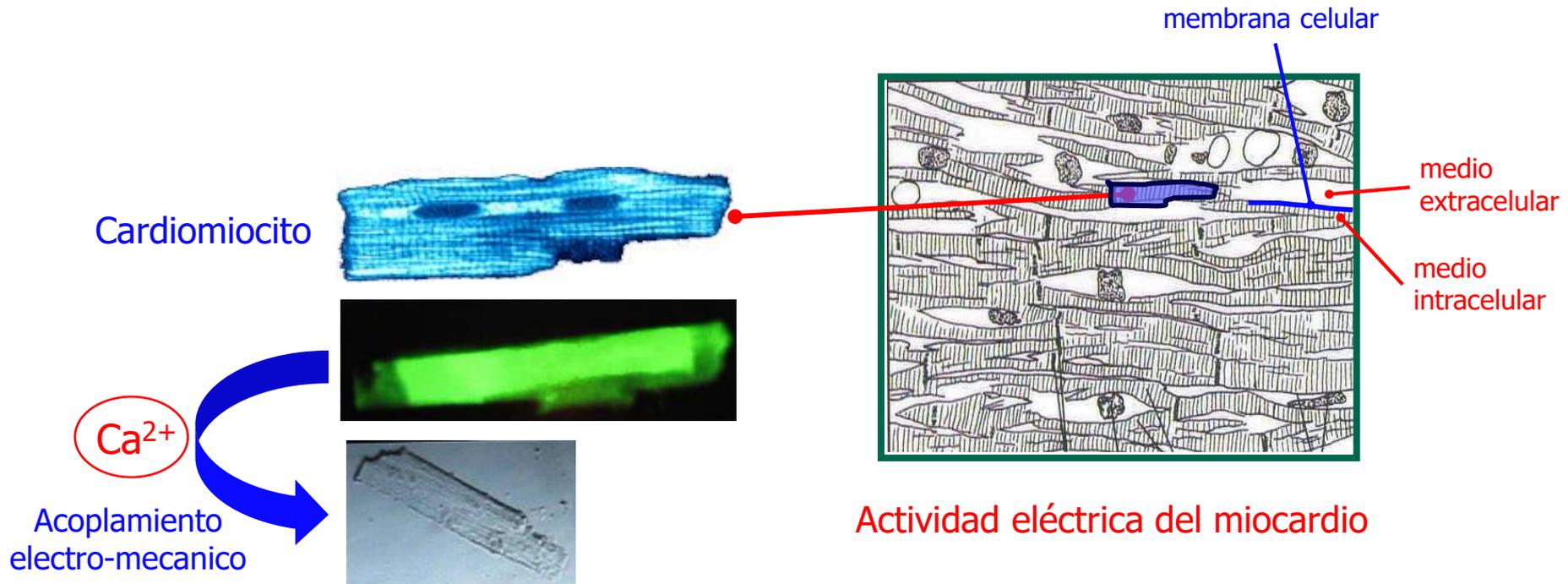
Célula

Canal Iónico

Gen



Acoplamiento Electro-Mecánico en los cardiomiocitos



Cuerpo

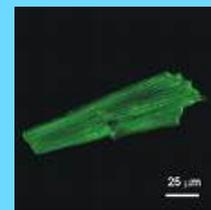
Órgano

Tejido

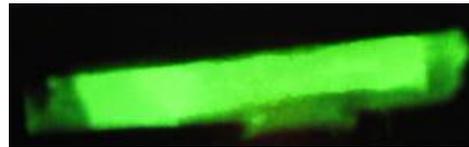
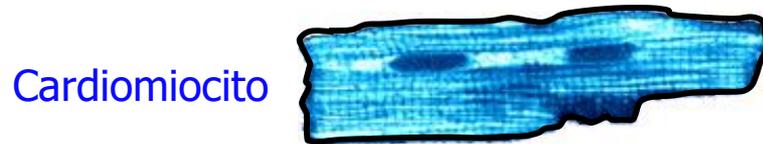
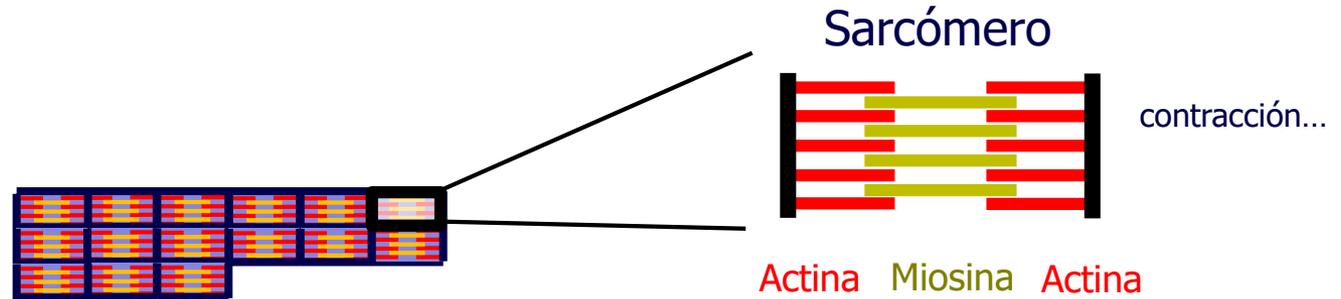
Célula

Canal Iónico

Gen



Acoplamiento Electro-Mecánico en los cardiomiocitos



Ca^{2+}

Acoplamiento electro-mecánico

Cuerpo



Órgano



Tejido



Célula



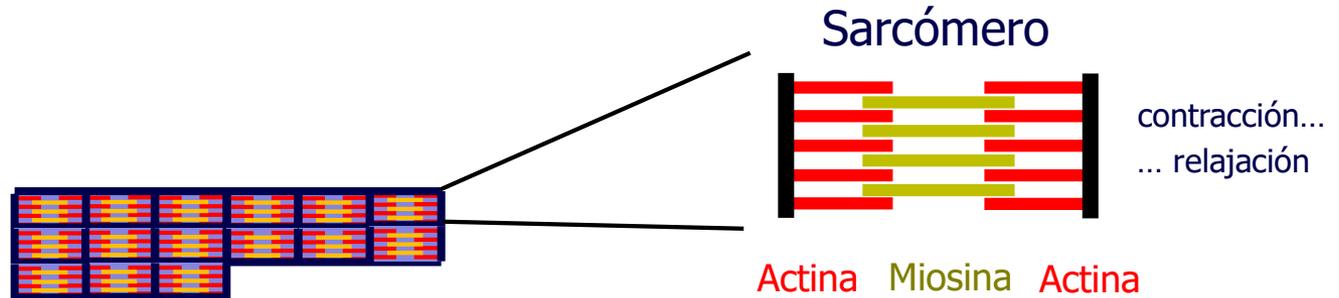
Canal Iónico



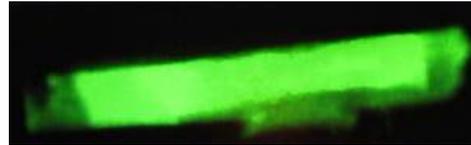
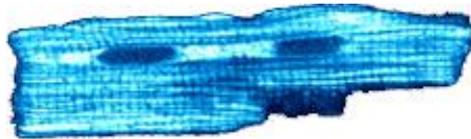
Gen



Acoplamiento Electro-Mecánico en los cardiomiocitos

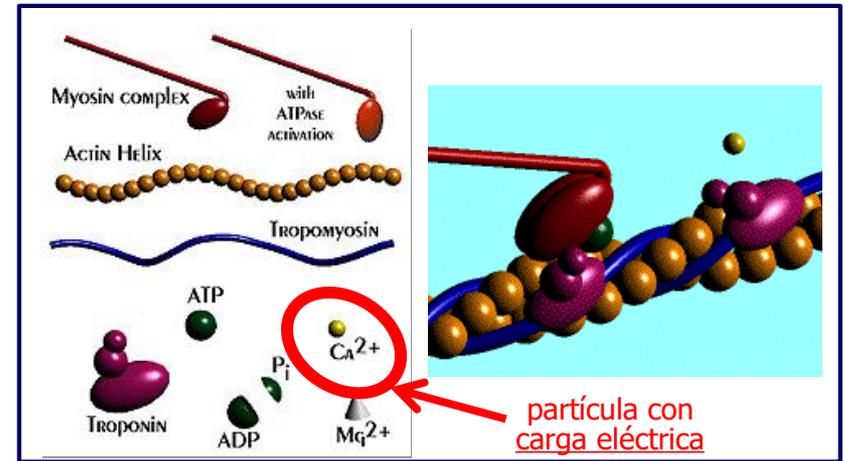


Cardiomiocito



Ca^{2+}

Acoplamiento electro-mecánico



Cuerpo



Órgano



Tejido



Célula



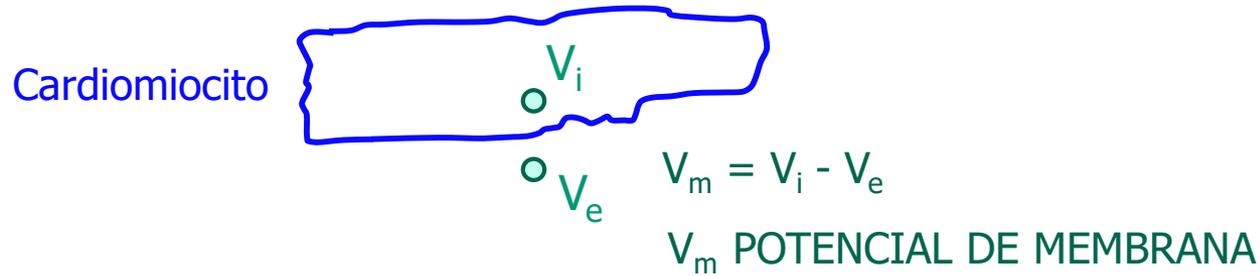
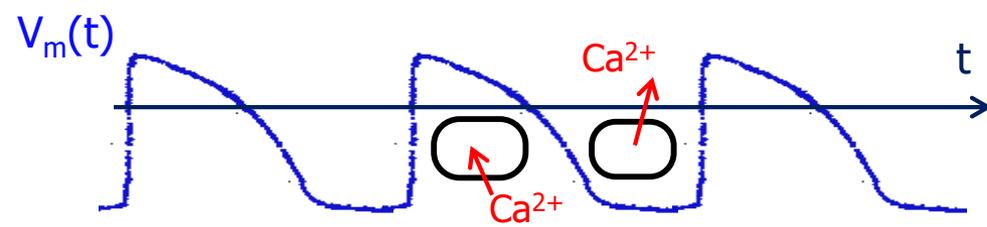
Canal Iónico



Gen



¿Cómo consigue la célula cardíaca meter y sacar calcio?



Cuerpo



Órgano



Tejido



Célula



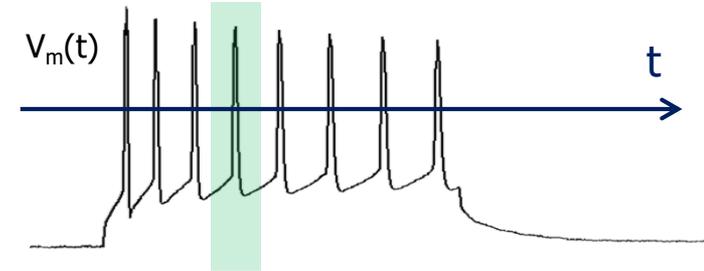
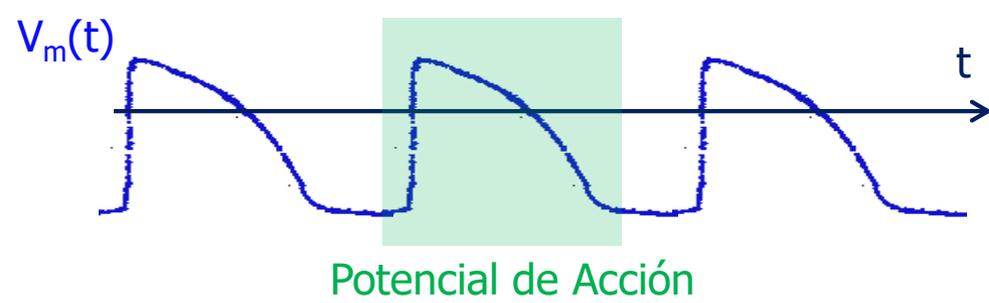
Canal Iónico



Gen



El potencial de acción



Cardiomiocito

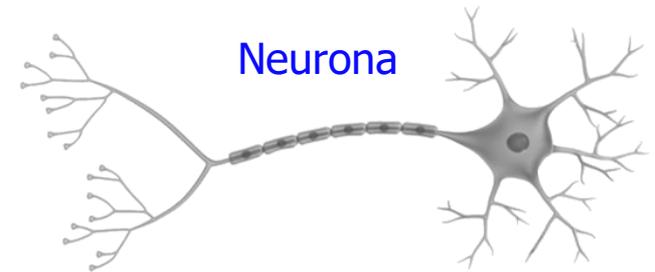


V_i

V_e

$$V_m = V_i - V_e$$

V_m POTENCIAL DE MEMBRANA



Cuerpo

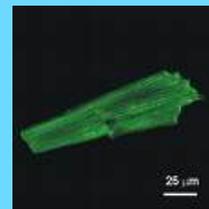
Órgano

Tejido

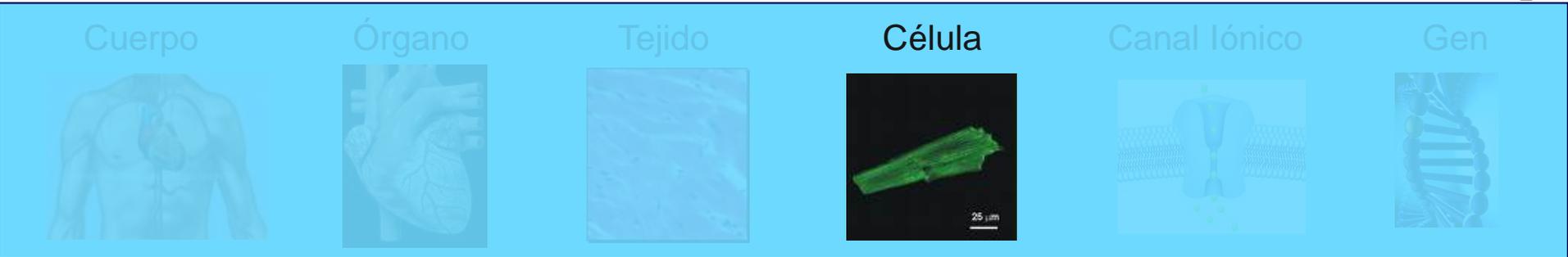
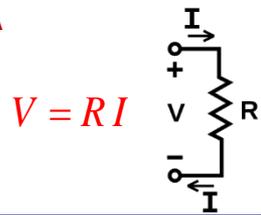
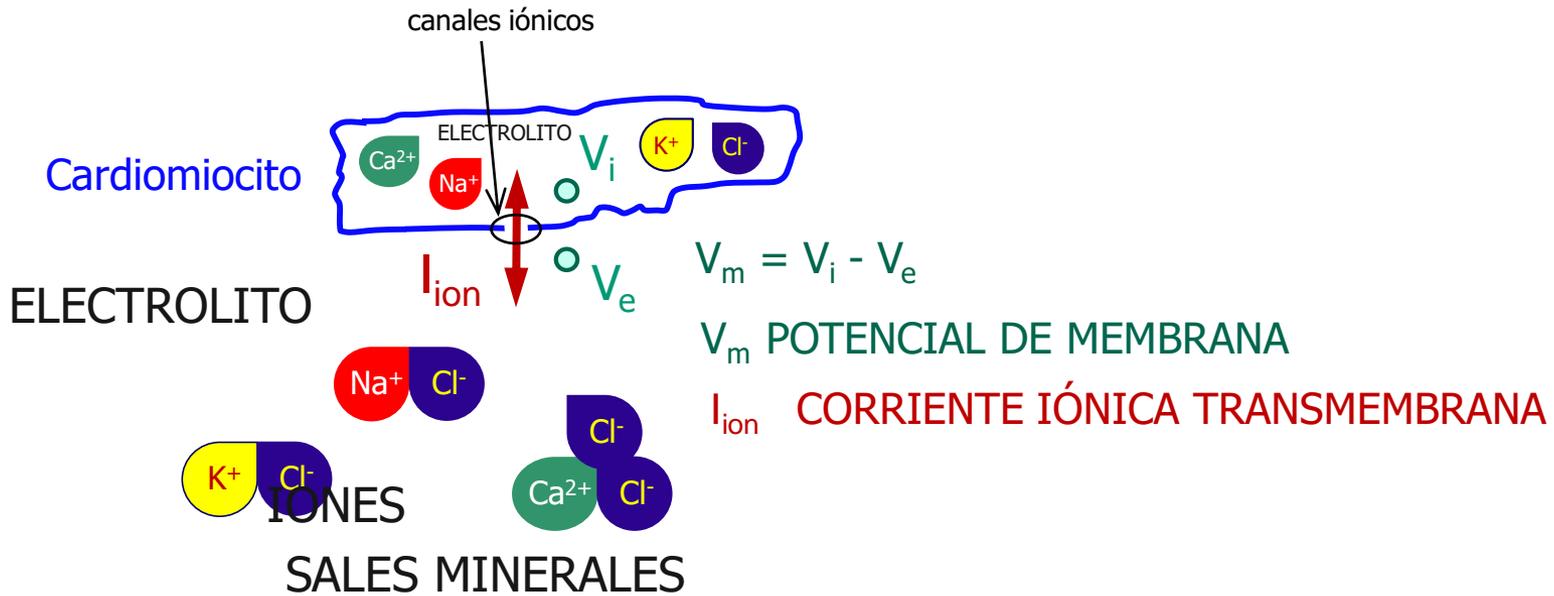
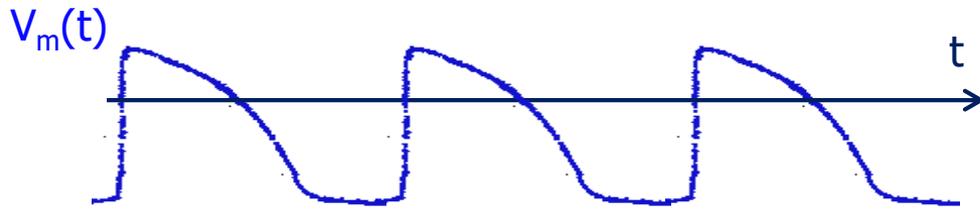
Célula

Canal Iónico

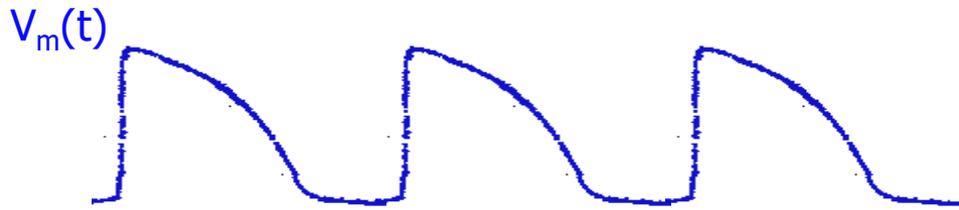
Gen



Conducción eléctrica celular



Las leyes básicas de la conducción iónica

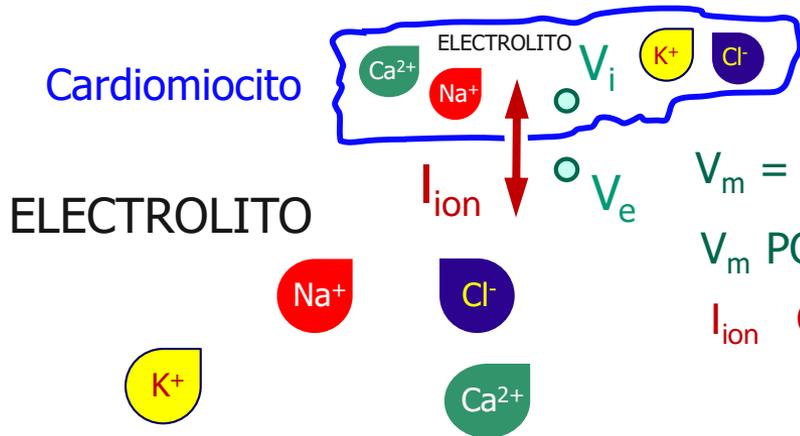


¿Quién impulsa a moverse a los iones?

1. DIFUSIÓN

↑ concentración → ↓ concentración

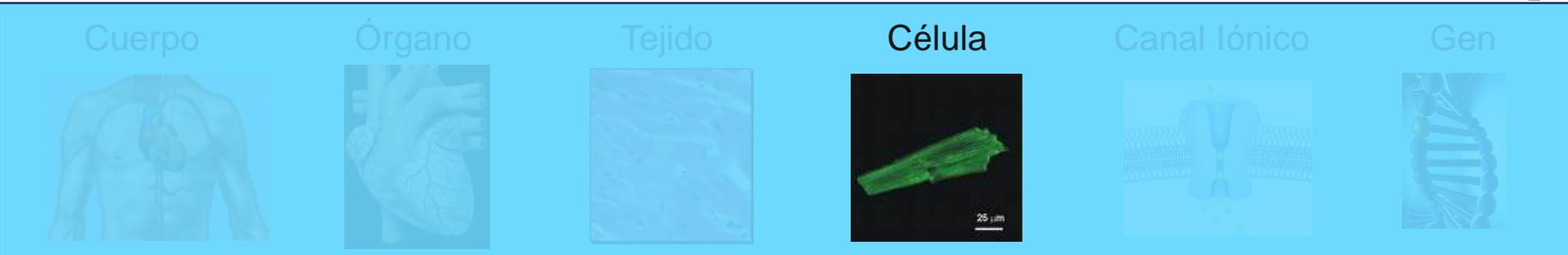
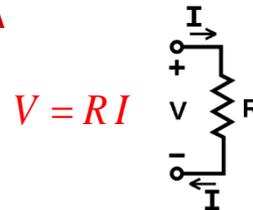
The diagram shows a transition from a high concentration of blue dots on the left to a lower concentration on the right, with a large blue arrow pointing from left to right to indicate the direction of diffusion.



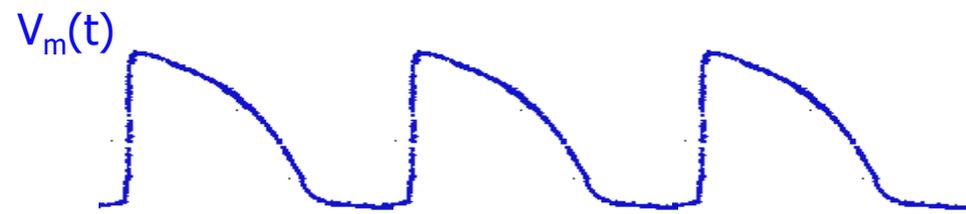
$$V_m = V_i - V_e$$

V_m POTENCIAL DE MEMBRANA

I_{ion} CORRIENTE IÓNICA TRANSMEMBRANA



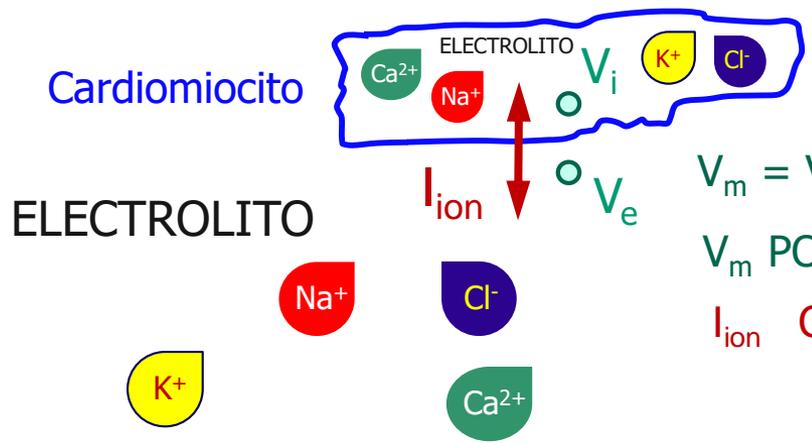
Las leyes básicas de la conducción iónica



¿Quién impulsa a moverse a los iones?

1. DIFUSIÓN
2. CAMPO ELÉCTRICO

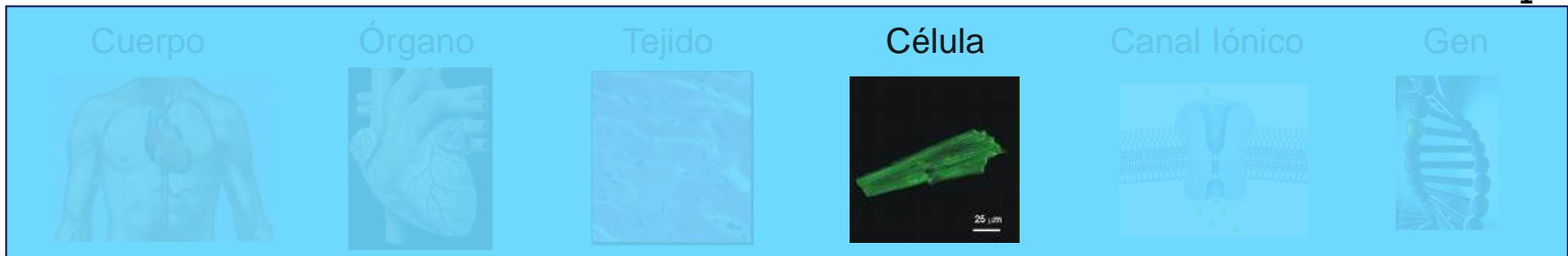
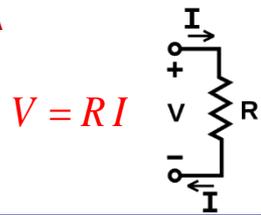
↑ potencial eléctrico V_m [+] → ↓ potencial eléctrico V_m [-]



$$V_m = V_i - V_e$$

V_m POTENCIAL DE MEMBRANA

I_{ion} CORRIENTE IÓNICA TRANSMEMBRANA

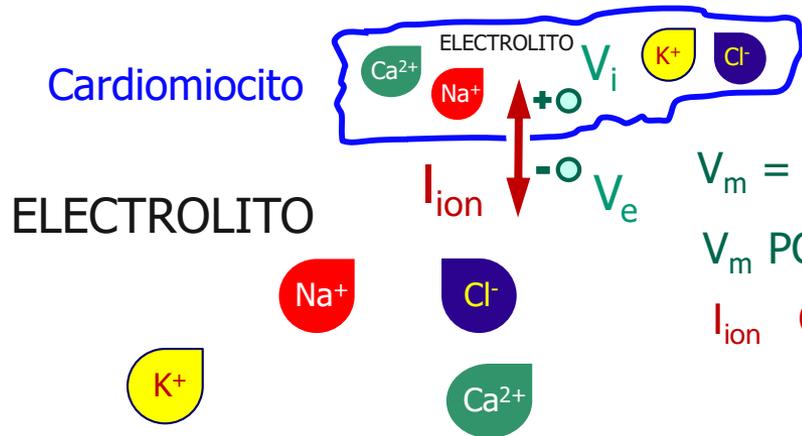


Criterio de signos en bioelectricidad



¿Quién impulsa a moverse a los iones?

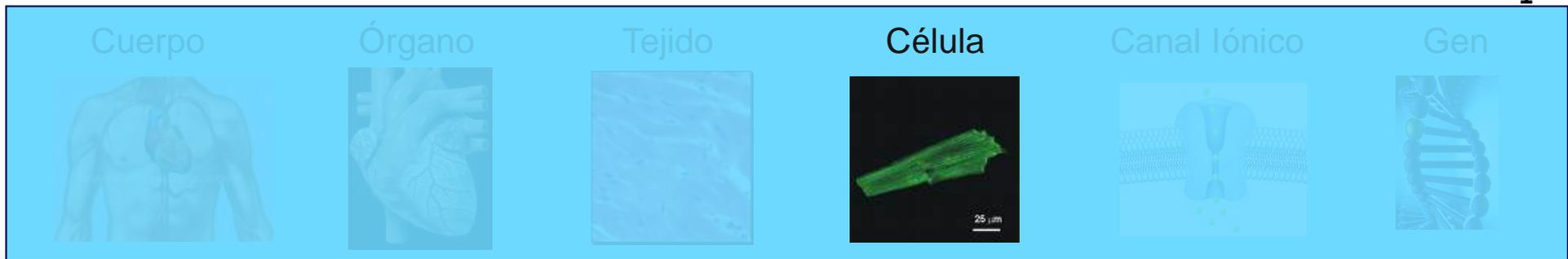
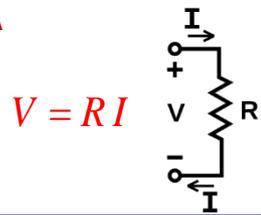
1. DIFUSIÓN
2. CAMPO ELÉCTRICO



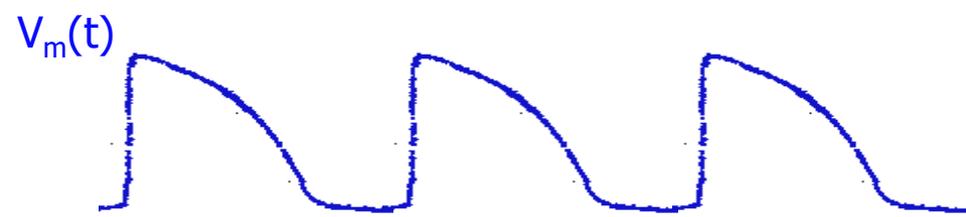
$$V_m = V_i - V_e$$

V_m POTENCIAL DE MEMBRANA

I_{ion} CORRIENTE IÓNICA TRANSMEMBRANA

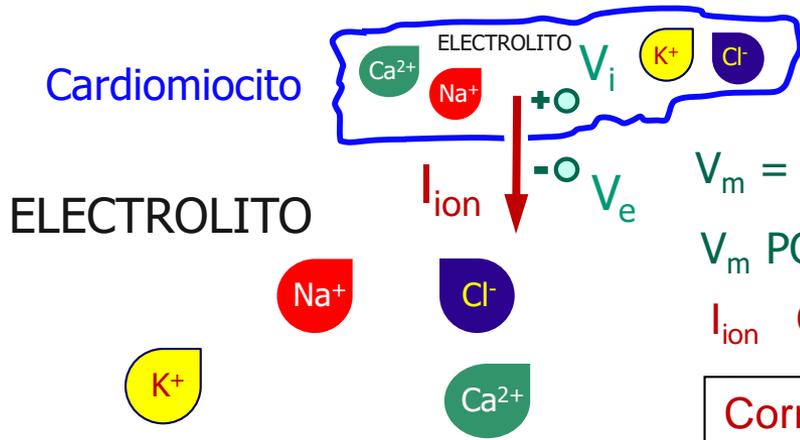


Criterio de signos en bioelectricidad



¿Quién impulsa a moverse a los iones?

1. DIFUSIÓN
2. CAMPO ELÉCTRICO

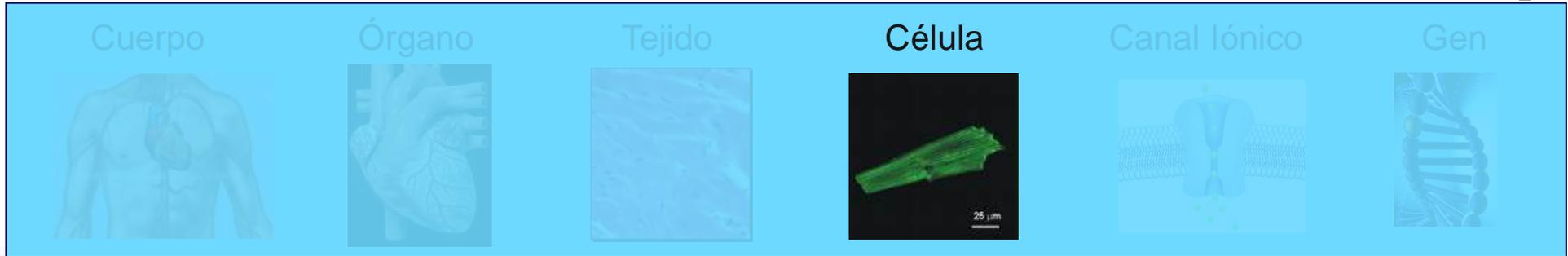
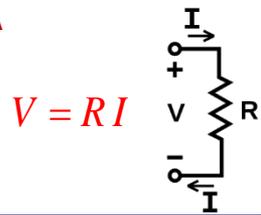


$$V_m = V_i - V_e$$

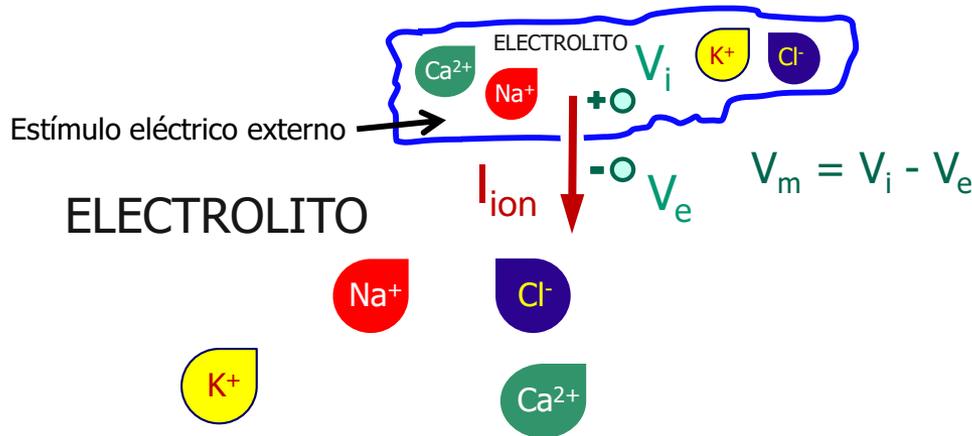
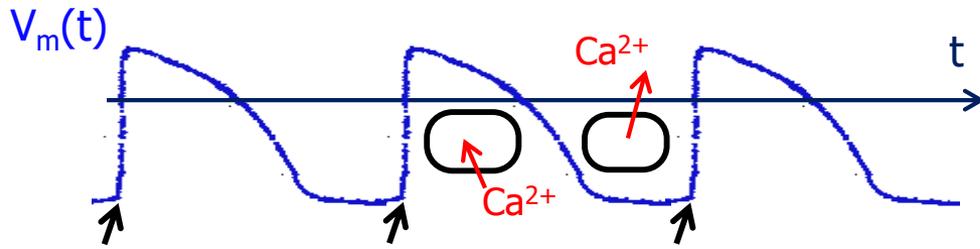
V_m POTENCIAL DE MEMBRANA

I_{ion} CORRIENTE IÓNICA TRANSMEMBRANA

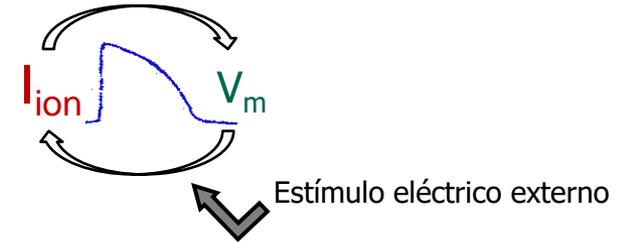
Corriente: saliente = positiva



La "autogestión" del potencial de acción



- La membrana celular se "autogestiona" el disparo de potenciales de acción



- Con cada uno de ellos, entra calcio en la célula y se produce la contracción (sístole), abandonándola después para producir la relajación diástole)
- Para iniciar cada potencial de acción, la célula necesita de un breve estímulo eléctrico que viene del exterior (rítmicamente)*

* Hay excepciones

$$V = RI$$

A simple circuit diagram showing a voltage source V , a resistor R , and a current I flowing through it.

Cuerpo



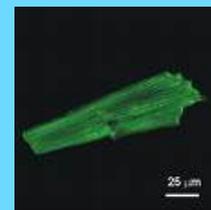
Órgano



Tejido



Célula



Canal Iónico



Gen



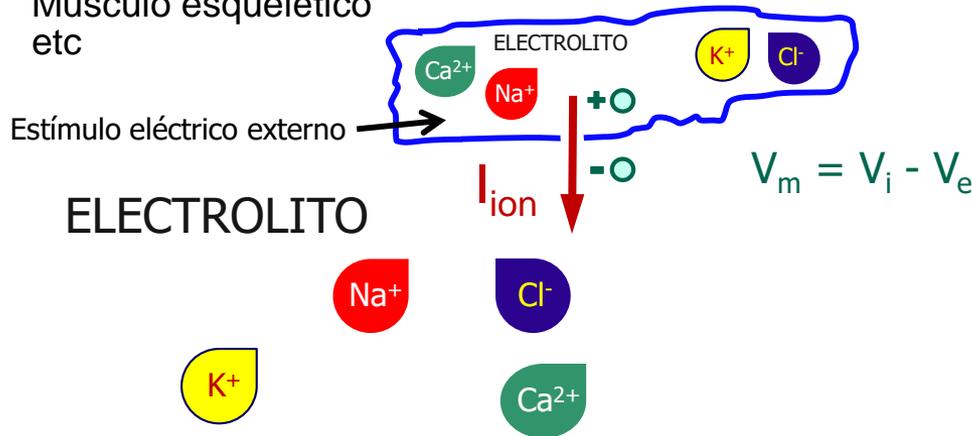
Las células excitables

En el corazón

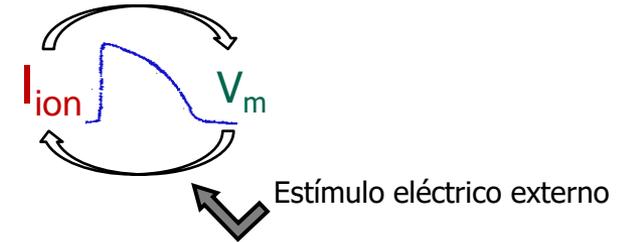
- Cardiomiocitos
- Células del sistema His-Purkinje
- Células del nodo sinusal
- Células del nodo aurículo-ventricular
- Miofibroblastos

En otros órganos

- Neuronas
- Células β del páncreas
- Músculo liso
- Músculo esquelético
- etc



- La membrana celular se "autogestiona" el disparo de potenciales de acción



- Con cada uno de ellos, entra calcio en la célula y se produce la contracción (sístole), abandonándola después para producir la relajación diástole)
- Para iniciar cada potencial de acción, la célula necesita de un breve estímulo eléctrico que viene del exterior (rítmicamente)*

* Hay excepciones

$$V = RI$$

Cuerpo



Órgano



Tejido



Célula



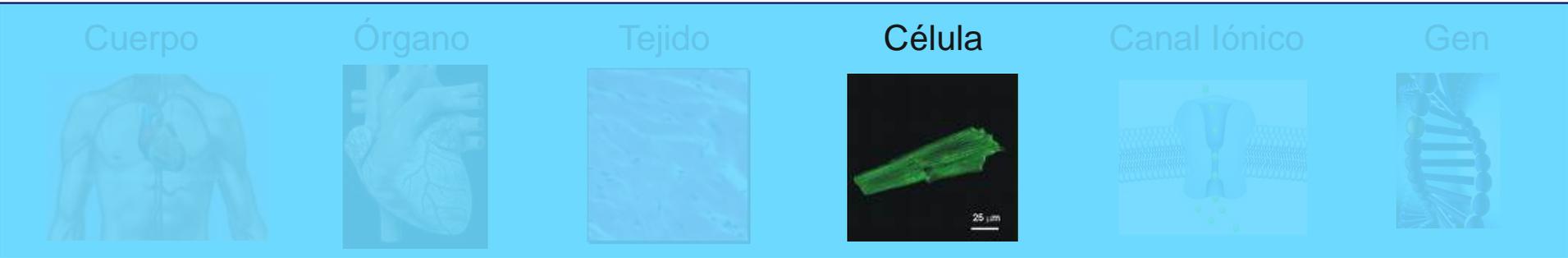
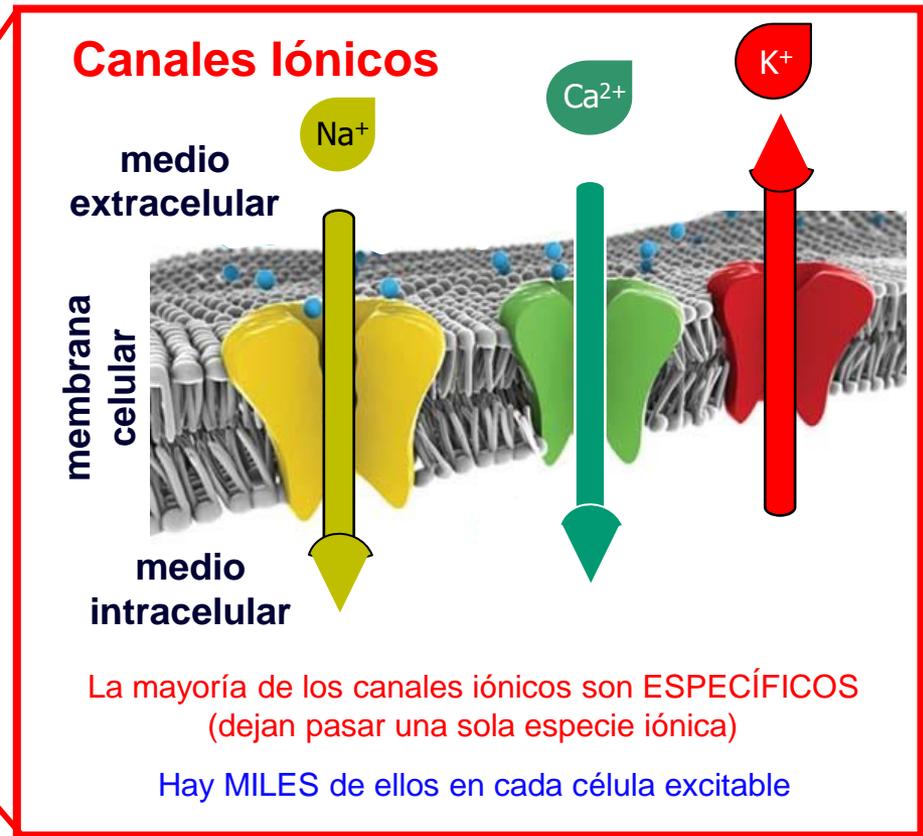
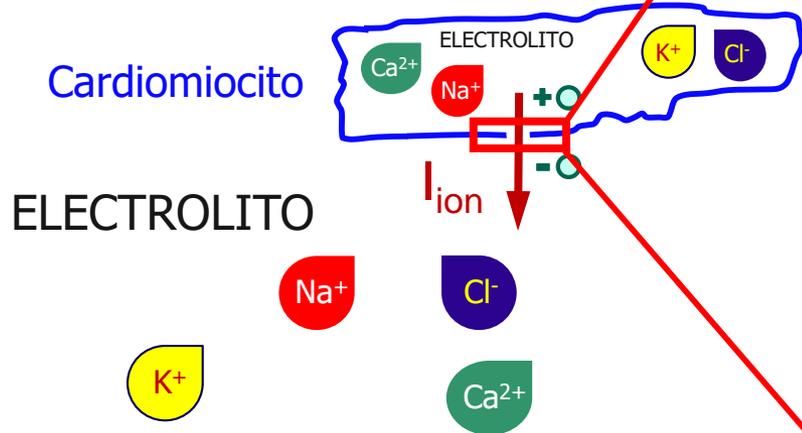
Canal Iónico



Gen

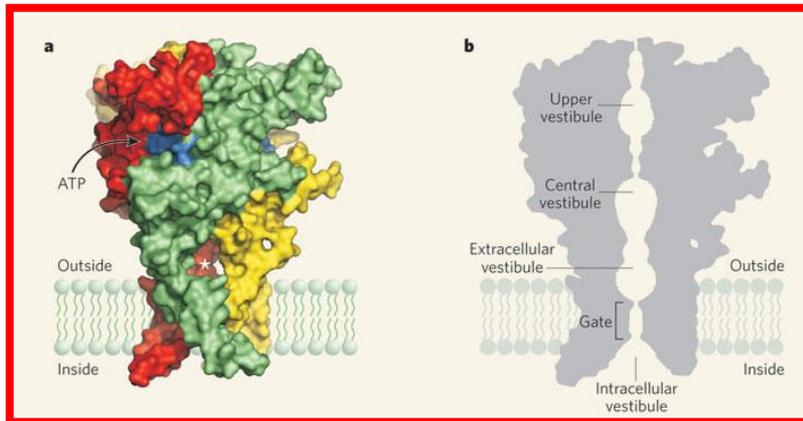


Corrientes iónicas y potencial de acción



Los canales iónicos son proteínas

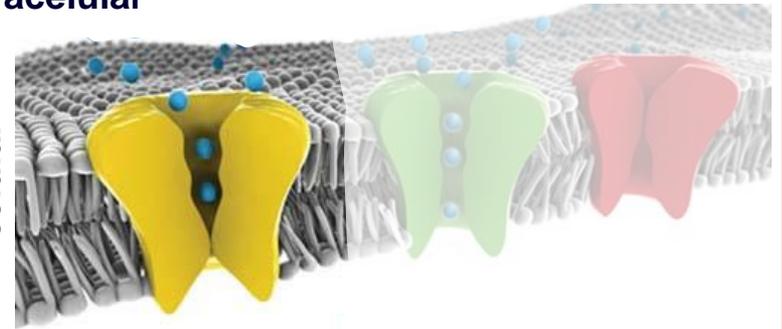
Un canal iónico es una macromolécula



Canales Iónicos

medio
extracelular

membrana
celular



medio
intracelular

La mayoría de los canales iónicos son **ESPECÍFICOS**
(dejan pasar una sola especie iónica)

Hay **MILES** de ellos en cada célula excitable

Cuerpo



Órgano



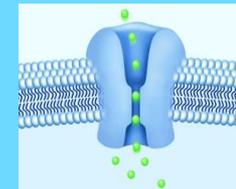
Tejido



Célula



Canal Iónico



Gen

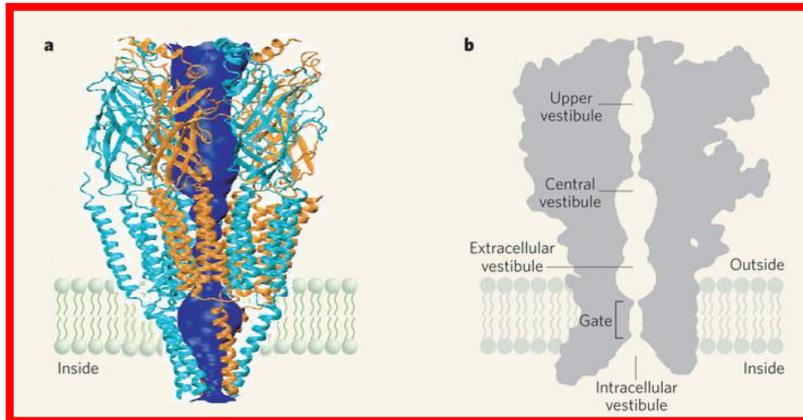


Los canales iónicos son proteínas

Estructura primaria



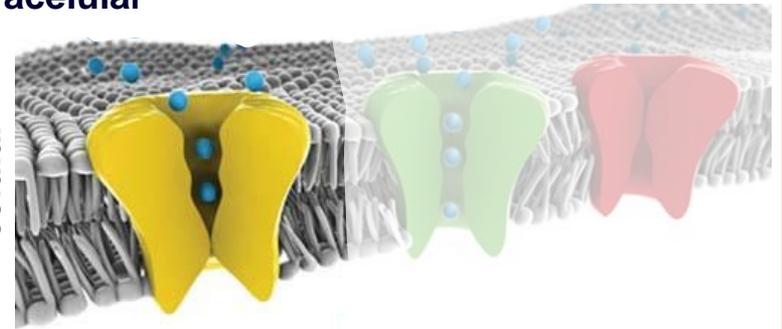
Un canal iónico es una proteína



Canales Iónicos

medio
extracelular

membrana
celular



medio
intracelular

La mayoría de los canales iónicos son **ESPECÍFICOS**
(dejan pasar una sola especie iónica)

Hay **MILES** de ellos en cada célula excitable

Cuerpo



Órgano



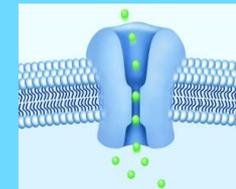
Tejido



Célula



Canal Iónico



Gen

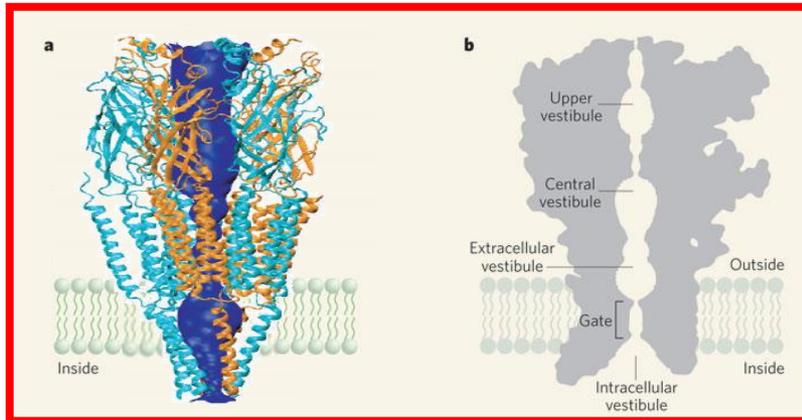


Los canales iónicos son proteínas

Estructura secundaria



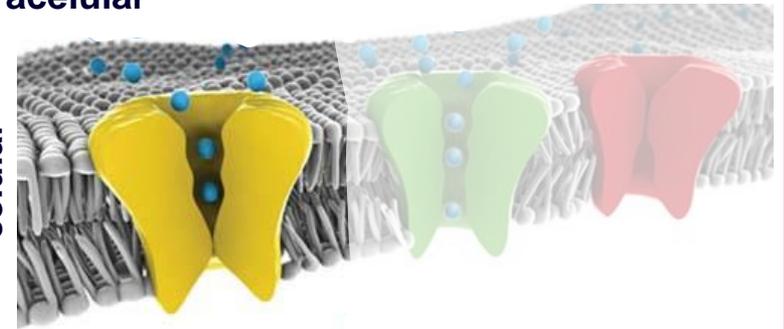
Un canal iónico es una proteína



Canales Iónicos

medio
extracelular

membrana
celular



medio
intracelular

La mayoría de los canales iónicos son **ESPECÍFICOS**
(dejan pasar una sola especie iónica)

Hay **MILES** de ellos en cada célula excitable

Cuerpo



Órgano



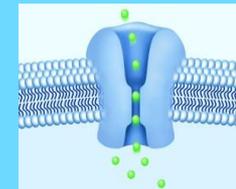
Tejido



Célula



Canal Iónico



Gen

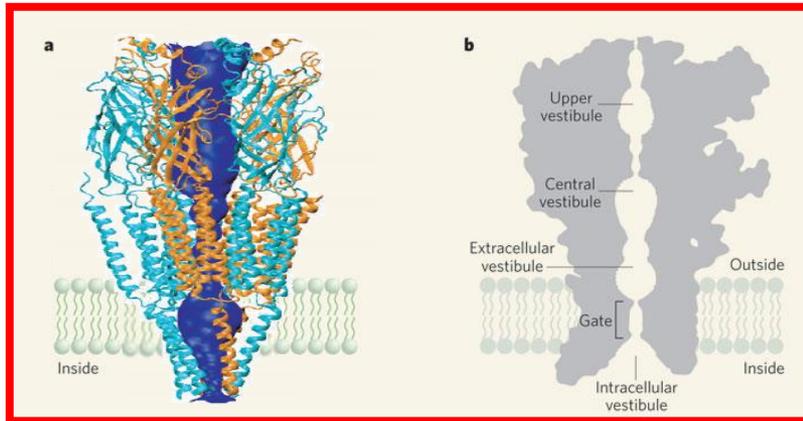


Los canales iónicos son proteínas

Estructura terciaria



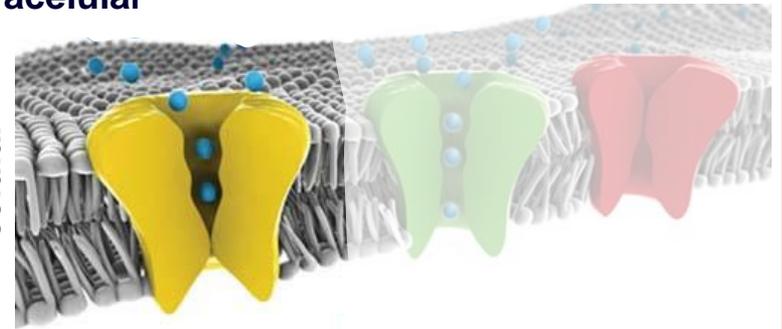
Un canal iónico es una proteína



Canales Iónicos

medio
extracelular

membrana
celular



medio
intracelular

La mayoría de los canales iónicos son **ESPECÍFICOS**
(dejan pasar una sola especie iónica)

Hay **MILES** de ellos en cada célula excitable

Cuerpo



Órgano



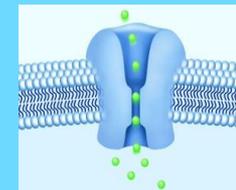
Tejido



Célula



Canal Iónico



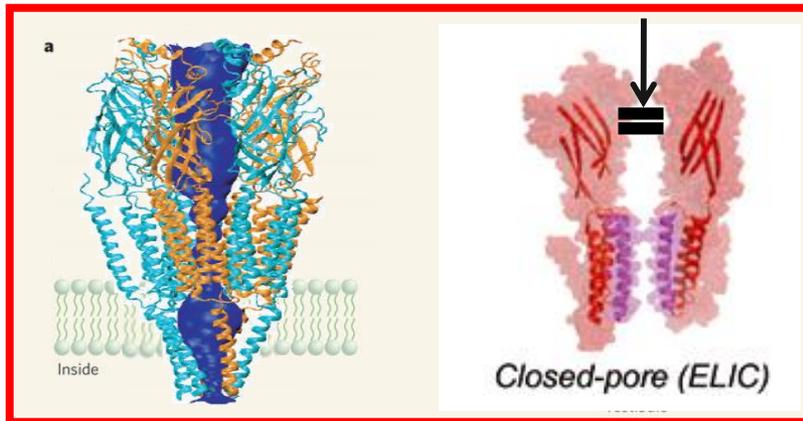
Gen



Corrientes a través de los canales iónicos: canal cerrado

Un canal iónico puede estar cerrado...

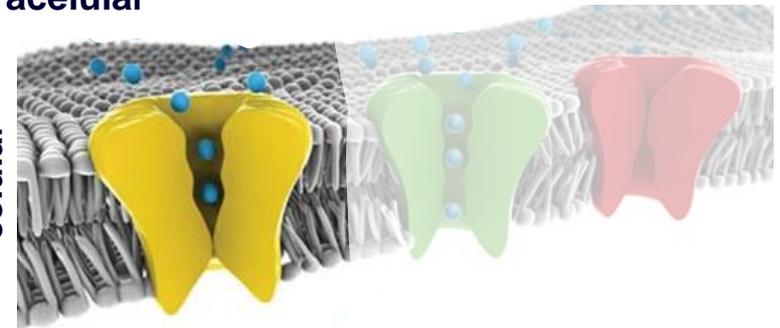
Un canal iónico es una proteína



Canales Iónicos

medio extracelular

membrana celular



medio intracelular

La mayoría de los canales iónicos son ESPECÍFICOS (dejan pasar una sola especie iónica)

Hay MILES de ellos en cada célula excitable

Cuerpo



Órgano



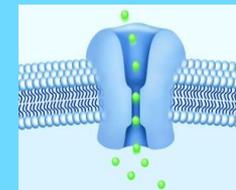
Tejido



Célula



Canal Iónico



Gen

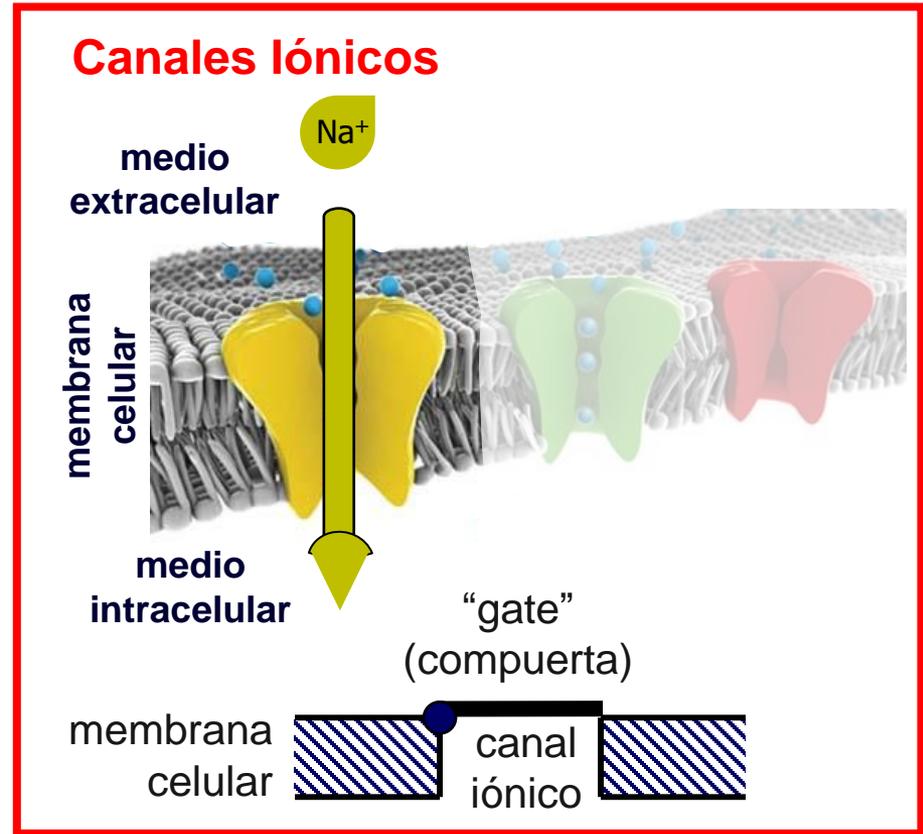
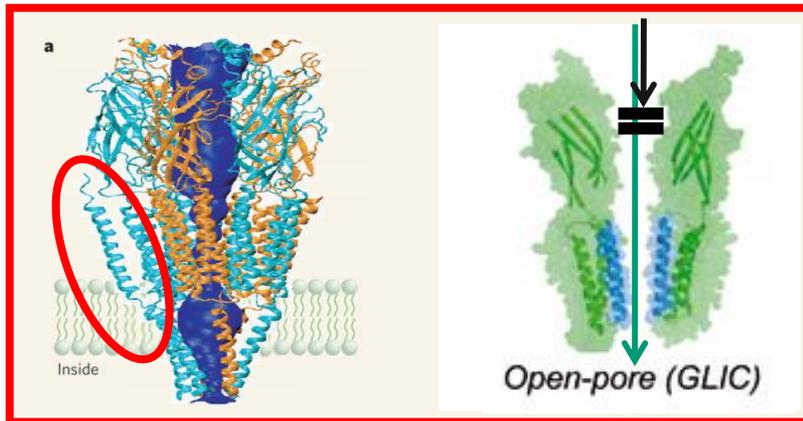


Corrientes a través de los canales iónicos: canal abierto

Un canal iónico puede estar cerrado...

... o puede estar abierto

Un canal iónico es una proteína



Cuerpo

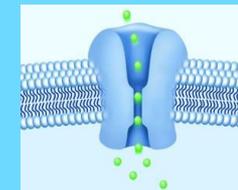
Órgano

Tejido

Célula

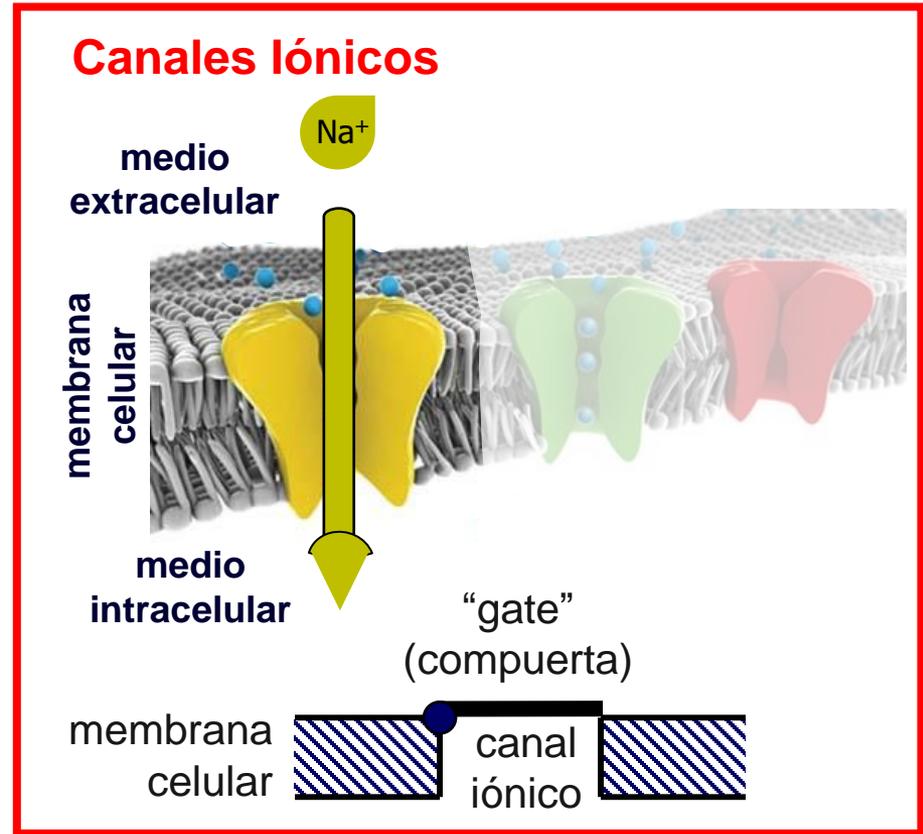
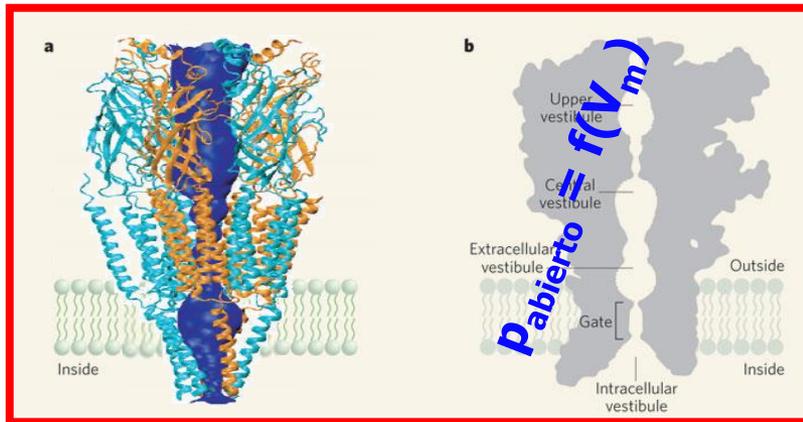
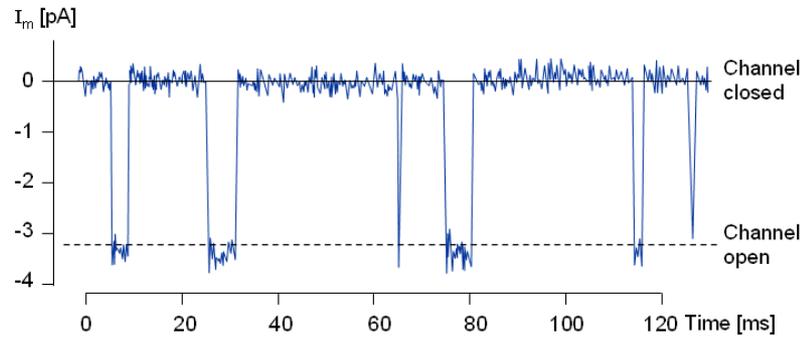
Canal Iónico

Gen



Corrientes a través de los canales iónicos

Corriente a través de un canal iónico individual (unitaria)



Cuerpo



Órgano



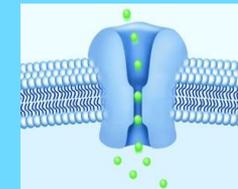
Tejido



Célula



Canal Iónico

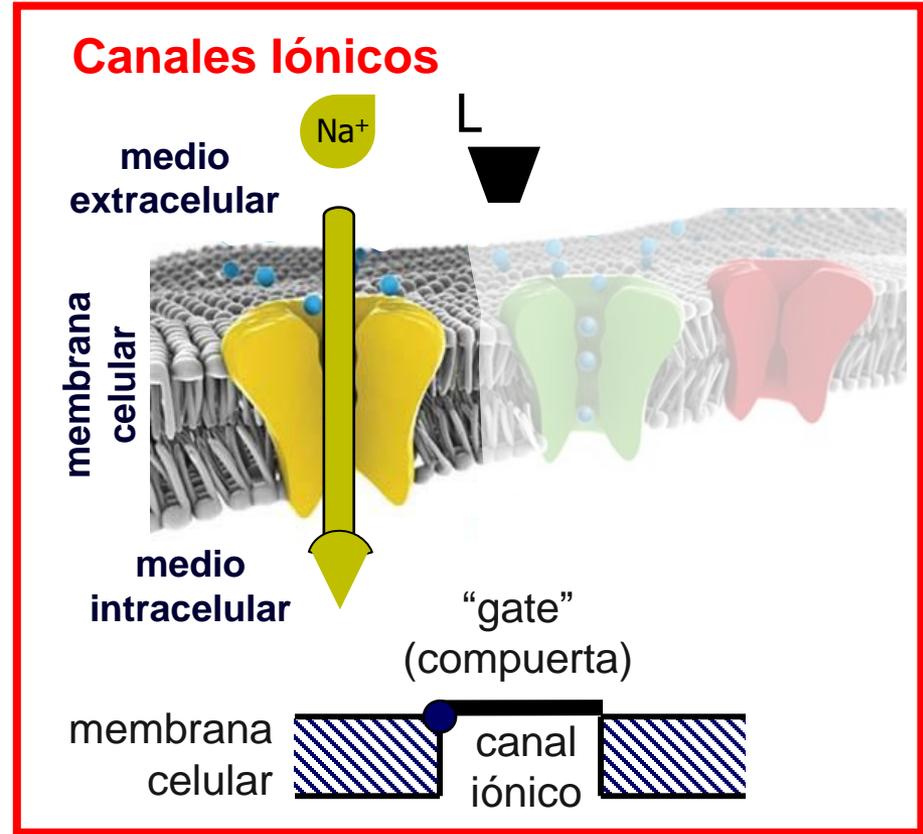
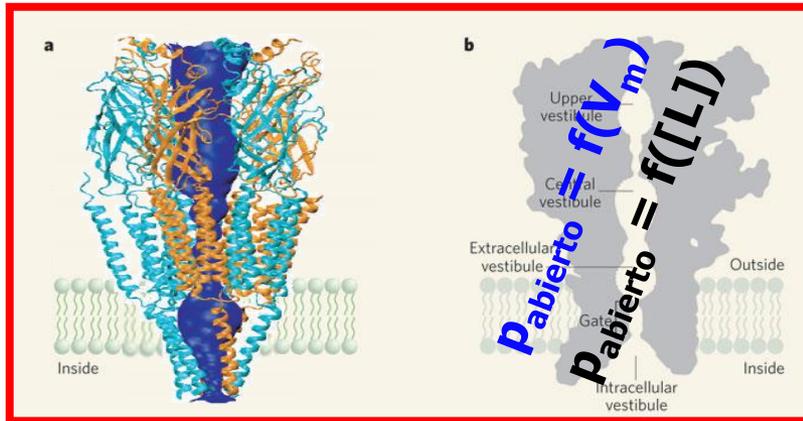
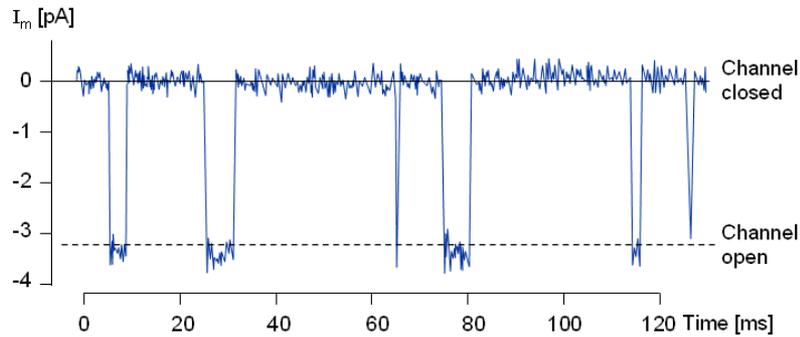


Gen



Canales iónicos y fármacos

Corriente a través de un canal iónico individual (unitaria)



Cuerpo



Órgano



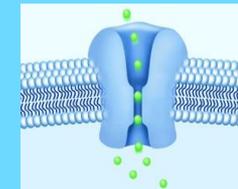
Tejido



Célula



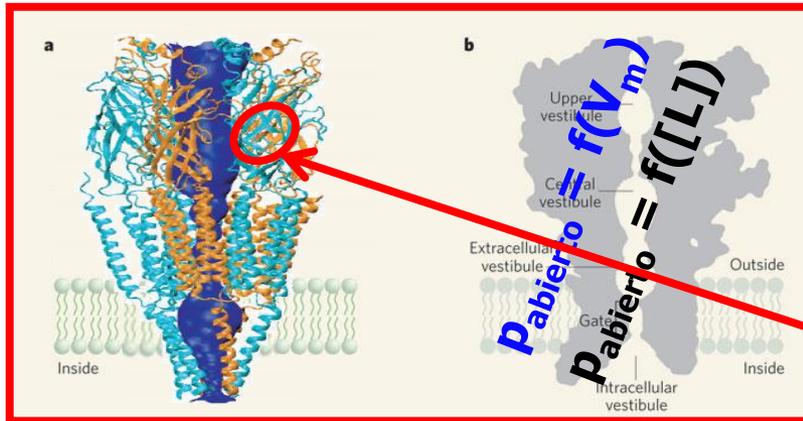
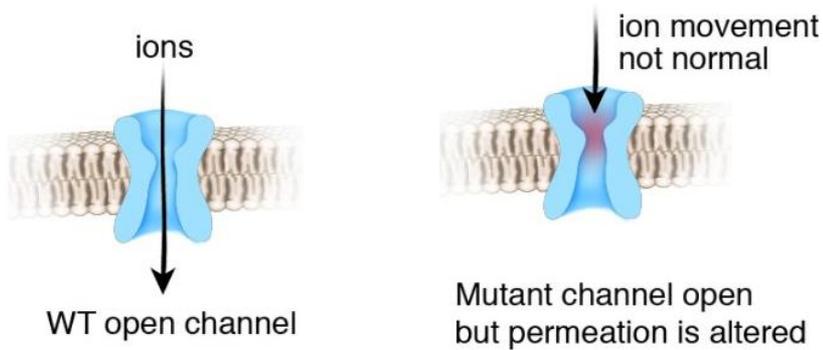
Canal Iónico



Gen



Efecto de las mutaciones sobre los canales iónicos



Canales Iónicos

Na⁺

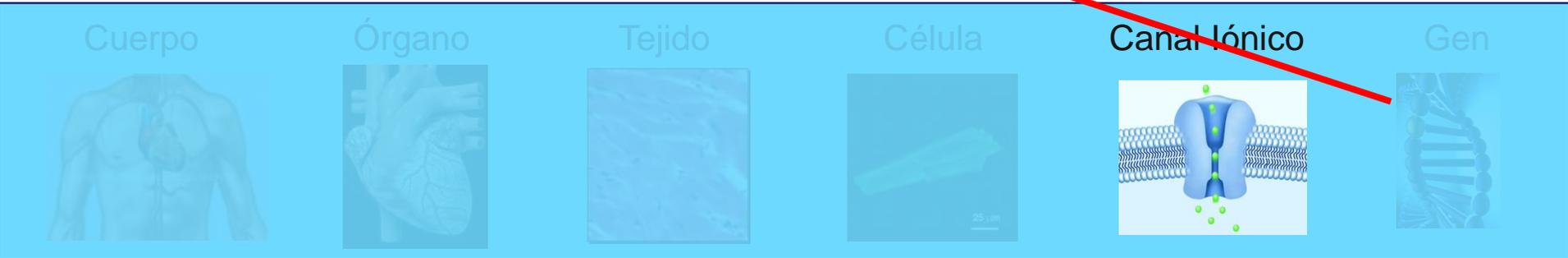
medio extracelular

membrana celular

medio intracelular

“gate” (compuerta)

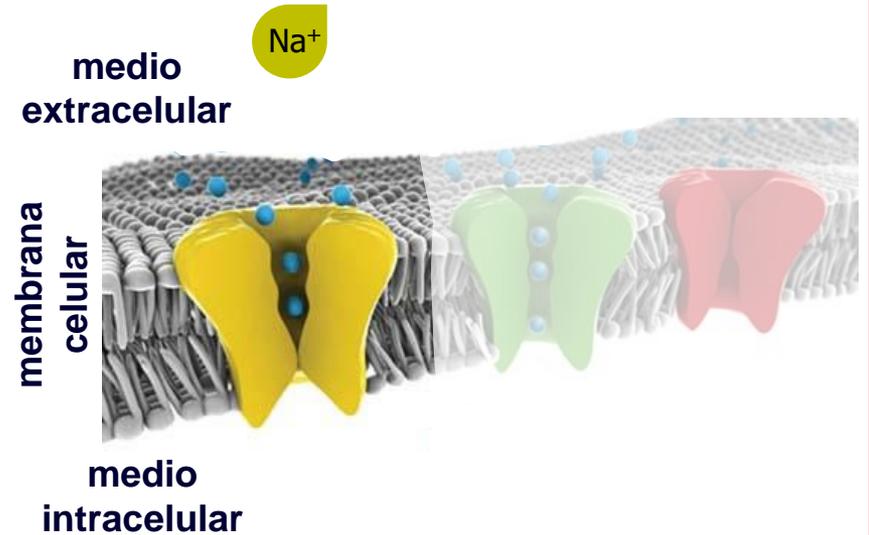
canal iónico



Tema 2

- 2.1.- Naturaleza multiescala de la Bioelectricidad
- 2.2.- **Diversidad de canales iónicos**
- 2.3.- Modelo eléctrico de una célula excitable
- 2.4.- Corrientes iónicas: difusión y campo eléctrico

Canales Iónicos



La mayoría de los canales iónicos son **ESPECÍFICOS**
(dejan pasar una sola especie iónica)

Hay **MILES** de ellos en cada célula excitable

Cuerpo



Órgano



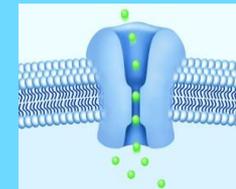
Tejido



Célula



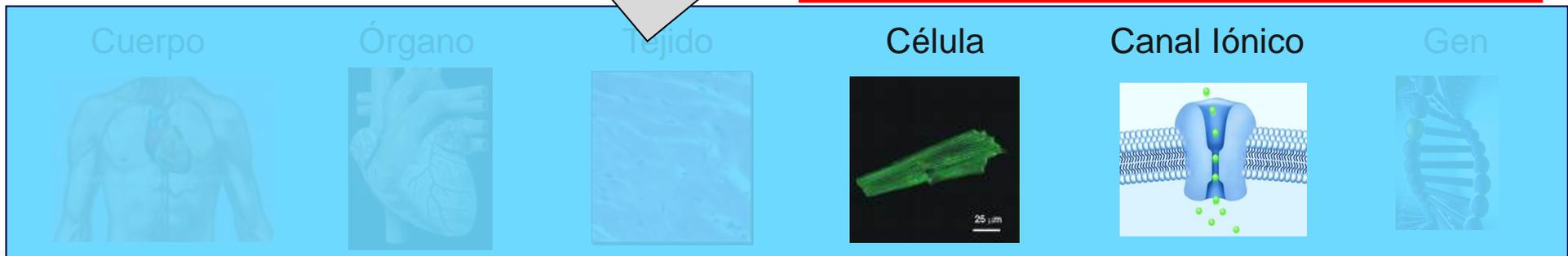
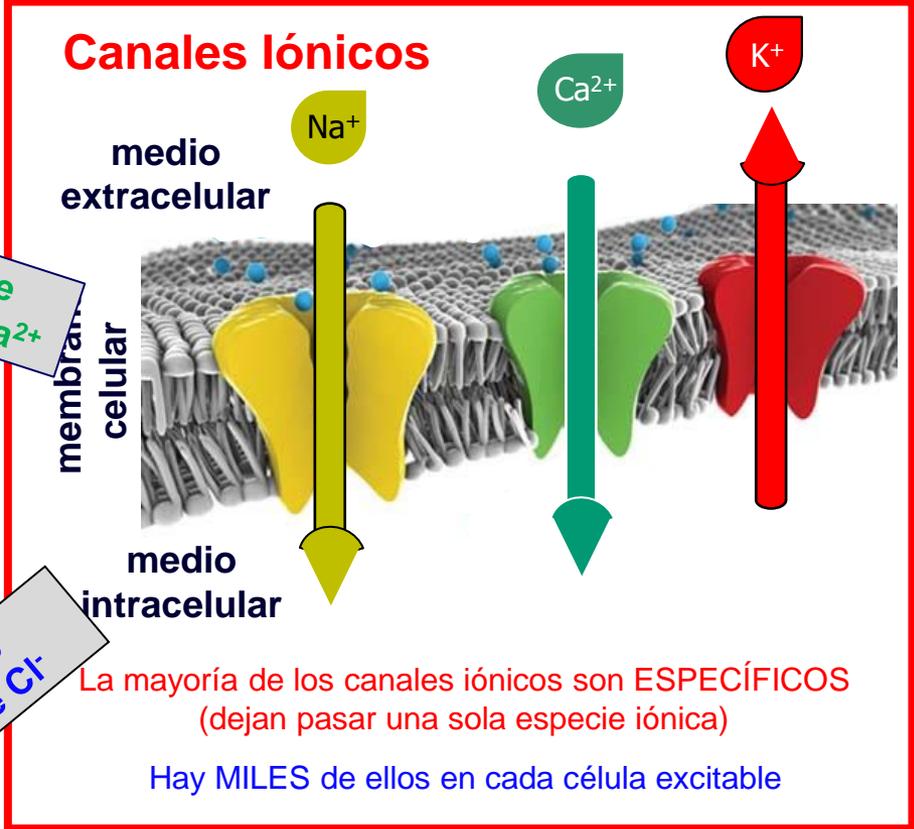
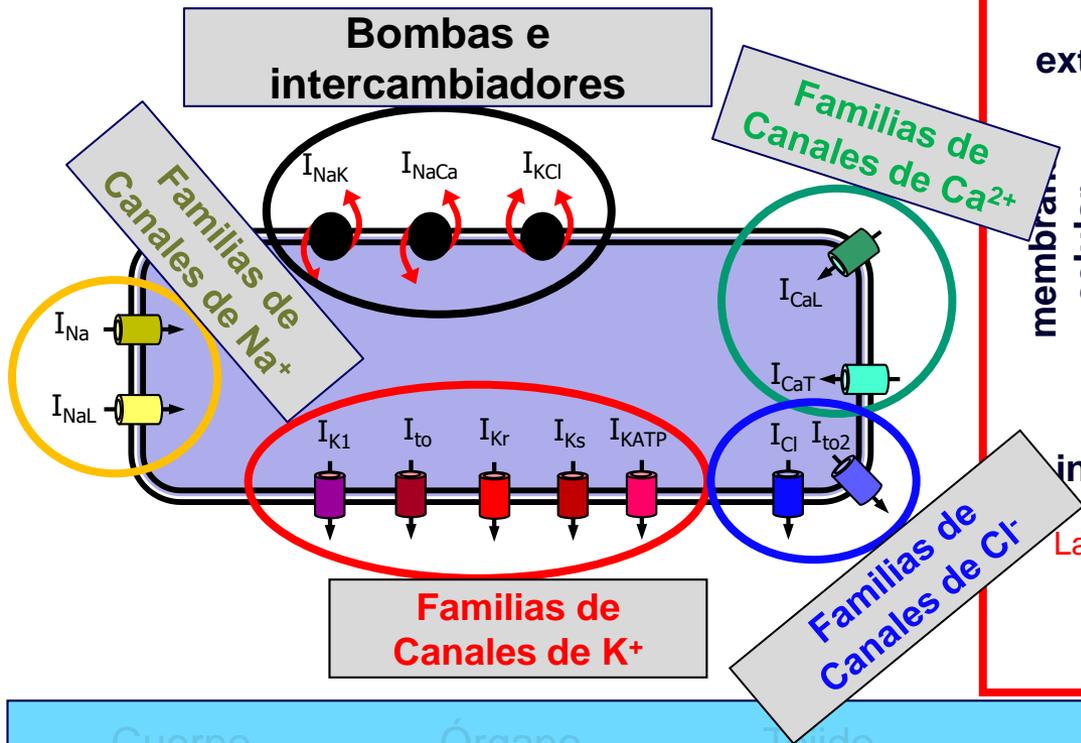
Canal Iónico



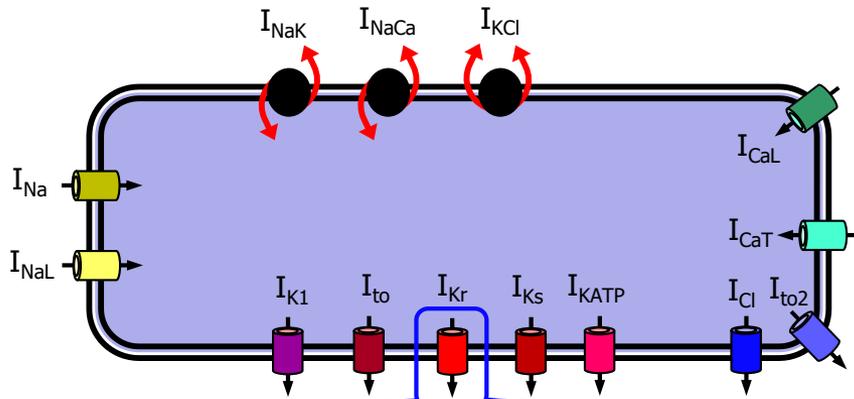
Gen



Canales iónicos: diversidad

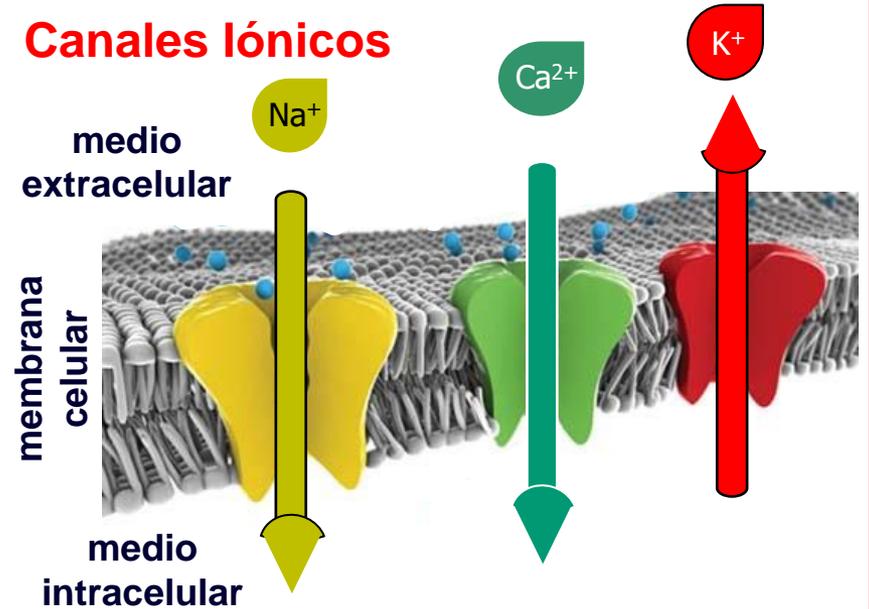


Familias/poblaciones de canales iónicos



Población (familia) de canales iónicos I_{Kr} (p. ej., 1600 canales)

Canales Iónicos



La mayoría de los canales iónicos son **ESPECÍFICOS** (dejan pasar una sola especie iónica)

Hay **MILES** de ellos en cada célula excitable

Cuerpo



Órgano



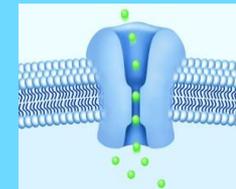
Tejido



Célula



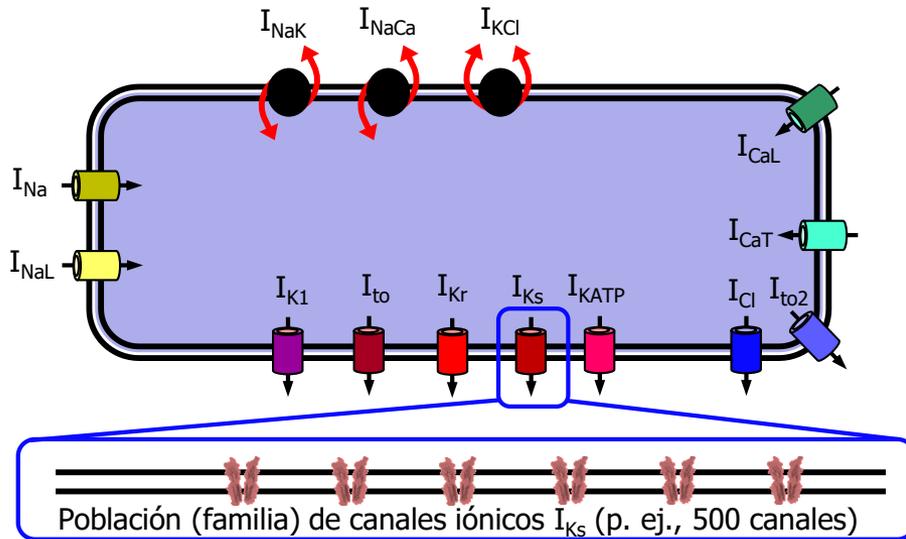
Canal Iónico



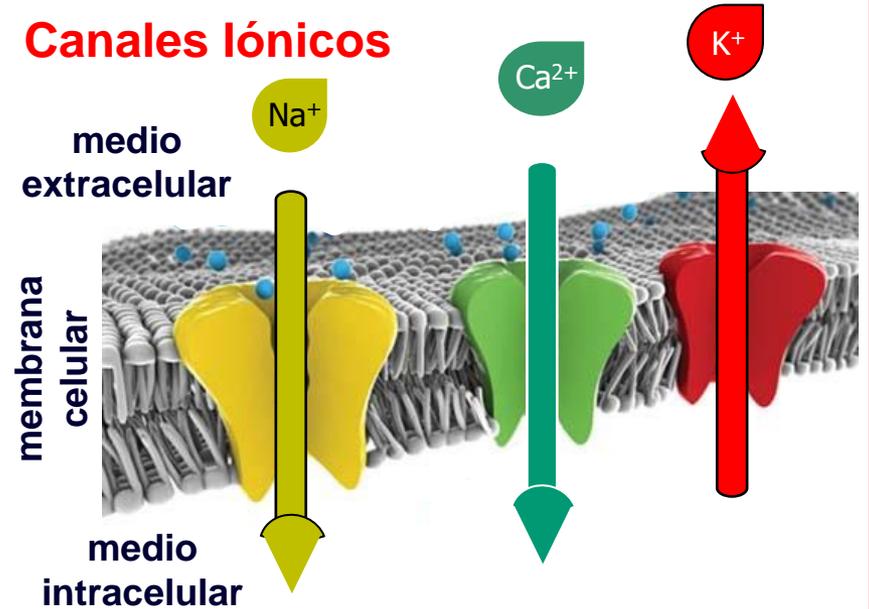
Gen



Familias/poblaciones de canales iónicos



Canales Iónicos



La mayoría de los canales iónicos son **ESPECÍFICOS** (dejan pasar una sola especie iónica)

Hay **MILES** de ellos en cada célula excitable

Cuerpo



Órgano



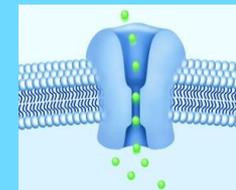
Tejido



Célula



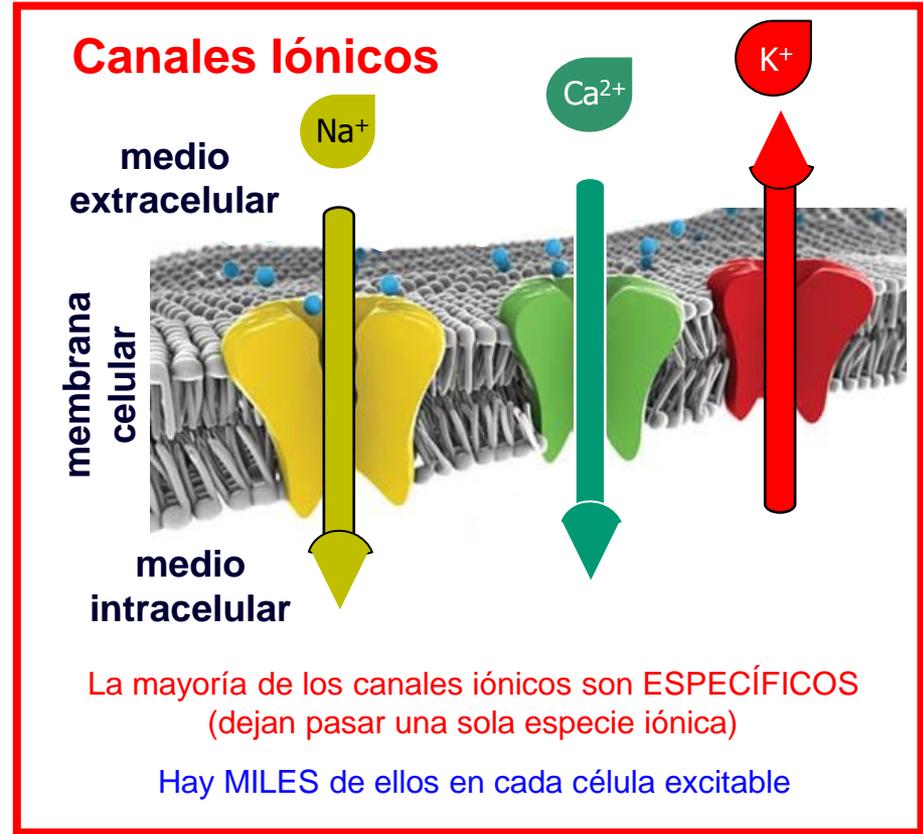
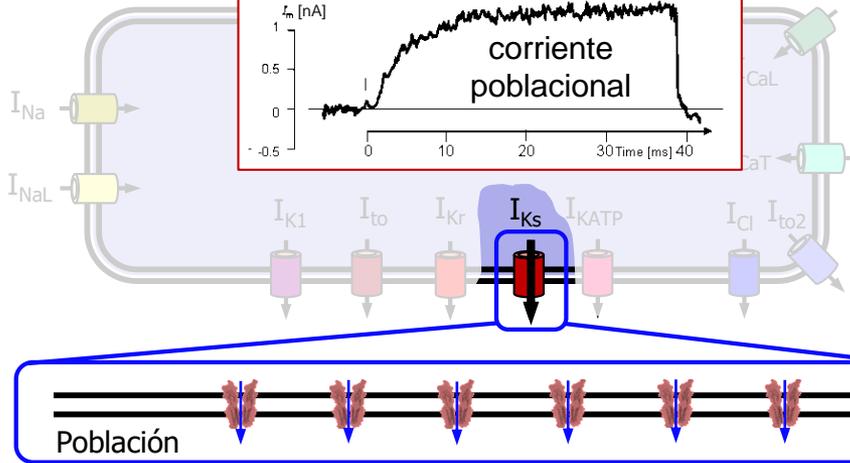
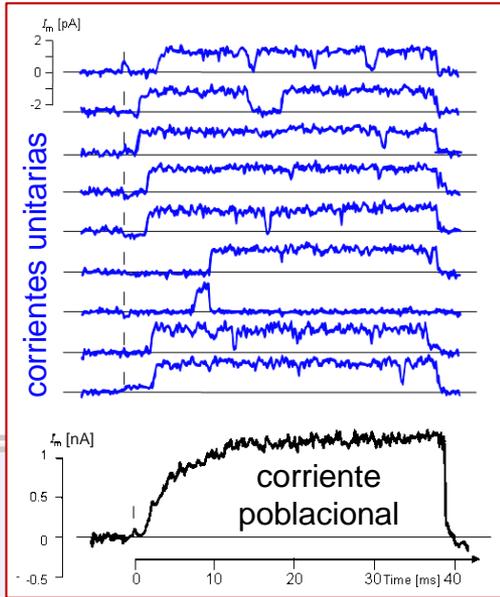
Canal Iónico



Gen



Corriente unitaria vs corriente poblacional



Cuerpo



Órgano



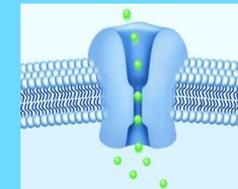
Tejido



Célula



Canal Iónico

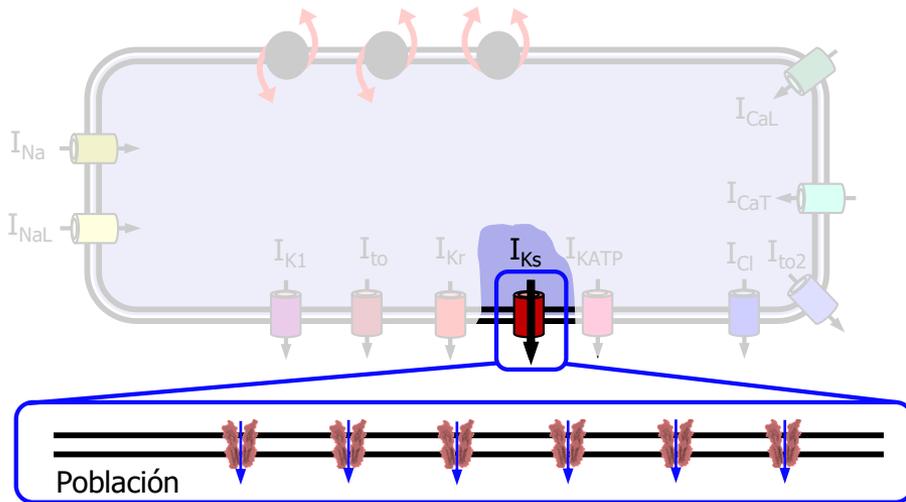


Gen



Tema 2

- 2.1.- Naturaleza multiescala de la Bioelectricidad
- 2.2.- Diversidad de canales iónicos
- 2.3.- Modelo eléctrico de una célula excitable
- 2.4.- Corrientes iónicas: difusión y campo eléctrico

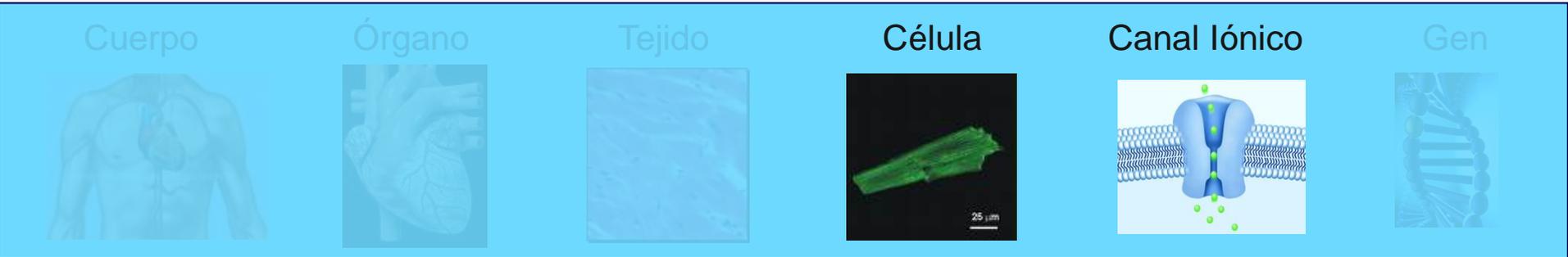


Canales Iónicos

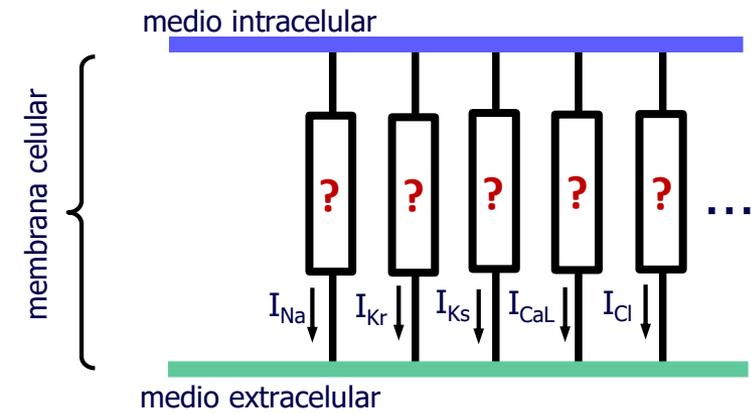
Diagrama de un canal iónico en una membrana celular. Muestra tres tipos de canales: uno para Na^+ (amarillo) que fluye hacia el interior, uno para Ca^{2+} (verde) que fluye hacia el interior, y uno para K^+ (rojo) que fluye hacia el exterior. Se indican "medio extracelular" y "medio intracelular".

La mayoría de los canales iónicos son ESPECÍFICOS (dejan pasar una sola especie iónica)

Hay MILES de ellos en cada célula excitable



Modelo eléctrico de una célula excitable



Canales Iónicos

medio extracelular

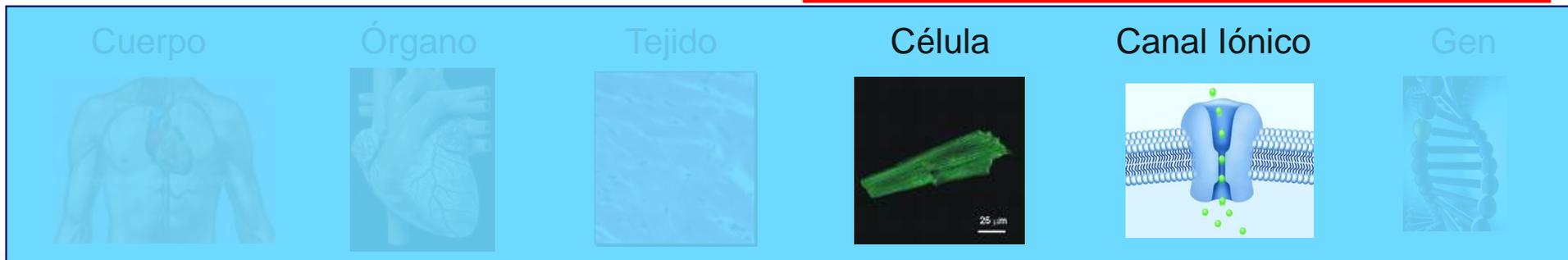
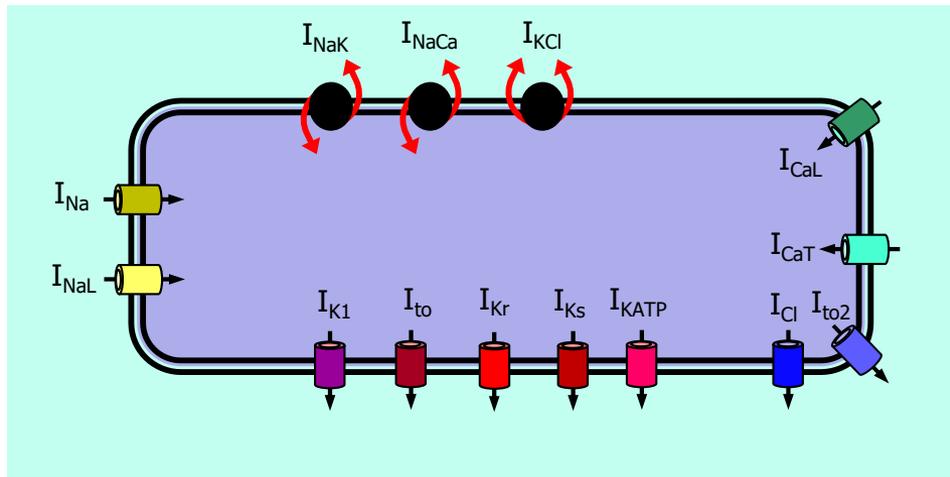
membrana celular

medio intracelular

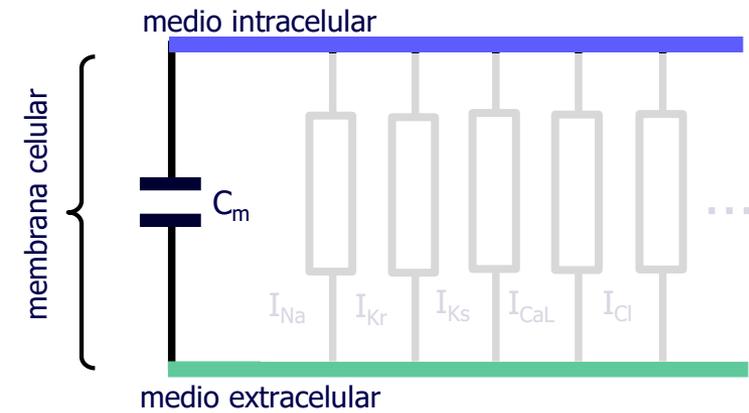
Na^+ Ca^{2+} K^+

La mayoría de los canales iónicos son ESPECÍFICOS (dejan pasar una sola especie iónica)

Hay MILES de ellos en cada célula excitable



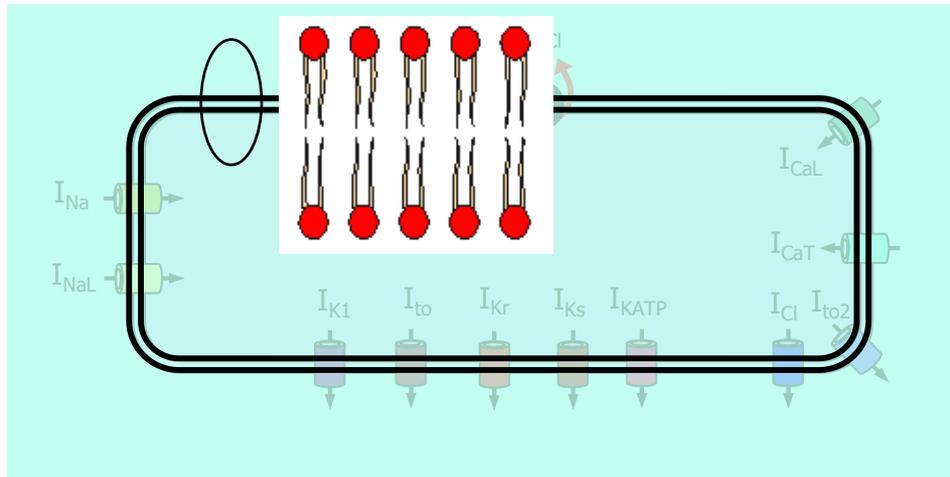
Modelo eléctrico de una célula excitable



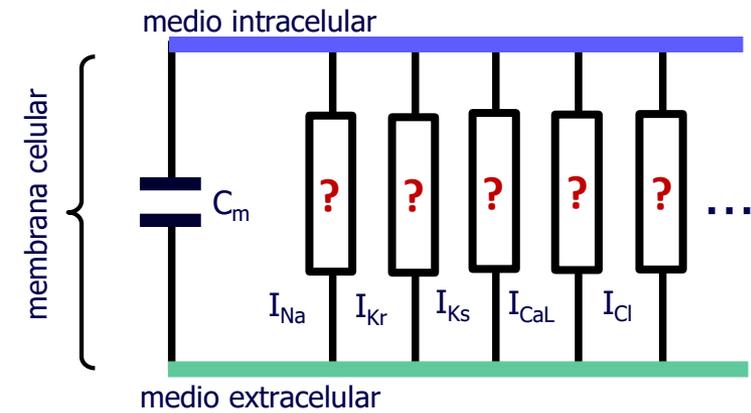
Canales Iónicos

La mayoría de los canales iónicos son **ESPECÍFICOS** (dejan pasar una sola especie iónica)

Hay **MILES** de ellos en cada célula excitable



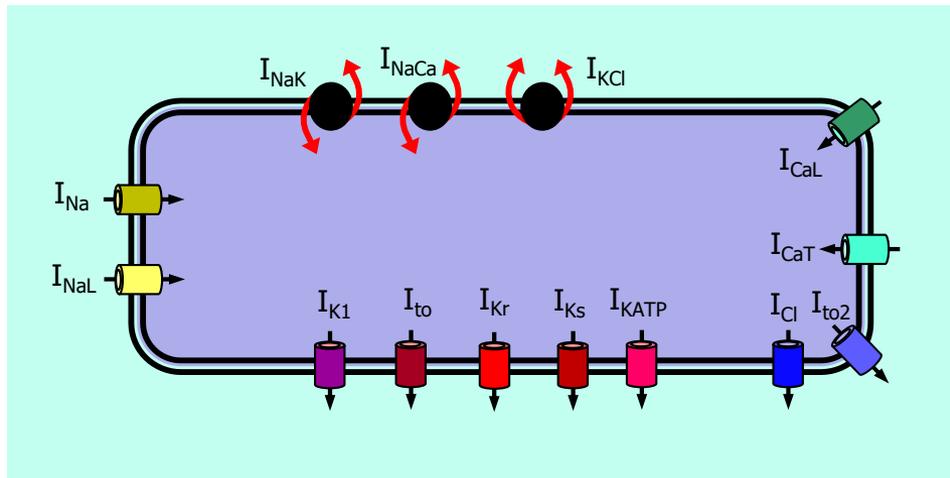
Modelo eléctrico de una célula excitable



Canales Iónicos

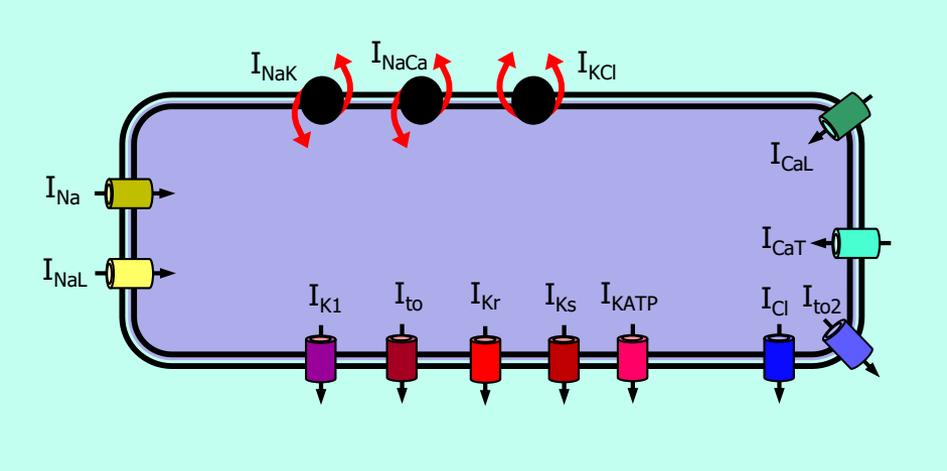
La mayoría de los canales iónicos son **ESPECÍFICOS** (dejan pasar una sola especie iónica)

Hay **MILES** de ellos en cada célula excitable



Tema 2

- 2.1.- Naturaleza multiescala de la Bioelectricidad
- 2.2.- Diversidad de canales iónicos
- 2.3.- Modelo eléctrico de una célula excitable
- 2.4.- Corrientes iónicas: difusión y campo eléctrico



Canales Iónicos

A 3D illustration of a cell membrane with three ion channels. A yellow channel allows Na^+ to enter from the extracellular space (medio extracelular) to the intracellular space (medio intracelular). A green channel allows Ca^{2+} to enter. A red channel allows K^+ to exit from the intracellular space to the extracellular space. The membrane is labeled 'membrana celular'.

La mayoría de los canales iónicos son ESPECÍFICOS (dejan pasar una sola especie iónica)

Hay MILES de ellos en cada célula excitable



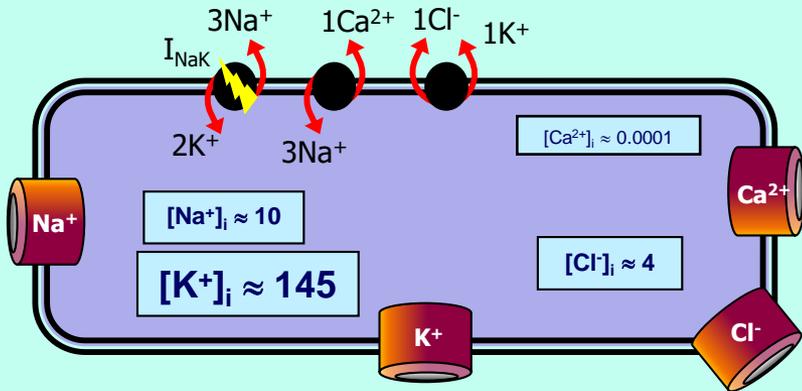
Concentraciones iónicas

$[Na^+]_o \approx 140$

$[Cl^-]_o \approx 115$

$[K^+]_o \approx 5$

$[Ca^{2+}]_o \approx 1.8$



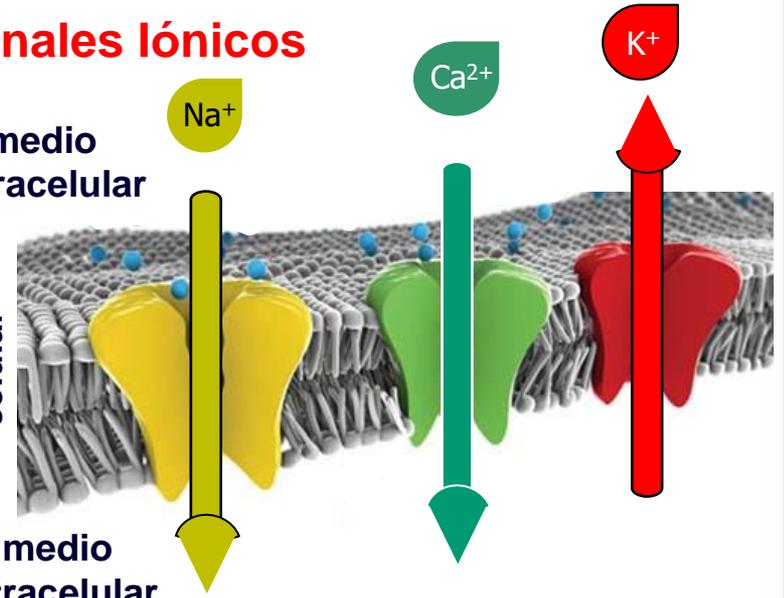
(concentraciones en mmol/L)

Canales Iónicos

medio extracelular

membrana celular

medio intracelular



La mayoría de los canales iónicos son ESPECÍFICOS (dejan pasar una sola especie iónica)

Hay MILES de ellos en cada célula excitable

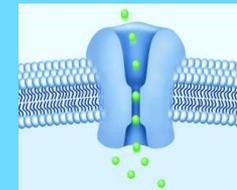


ISQUEMIA

Célula



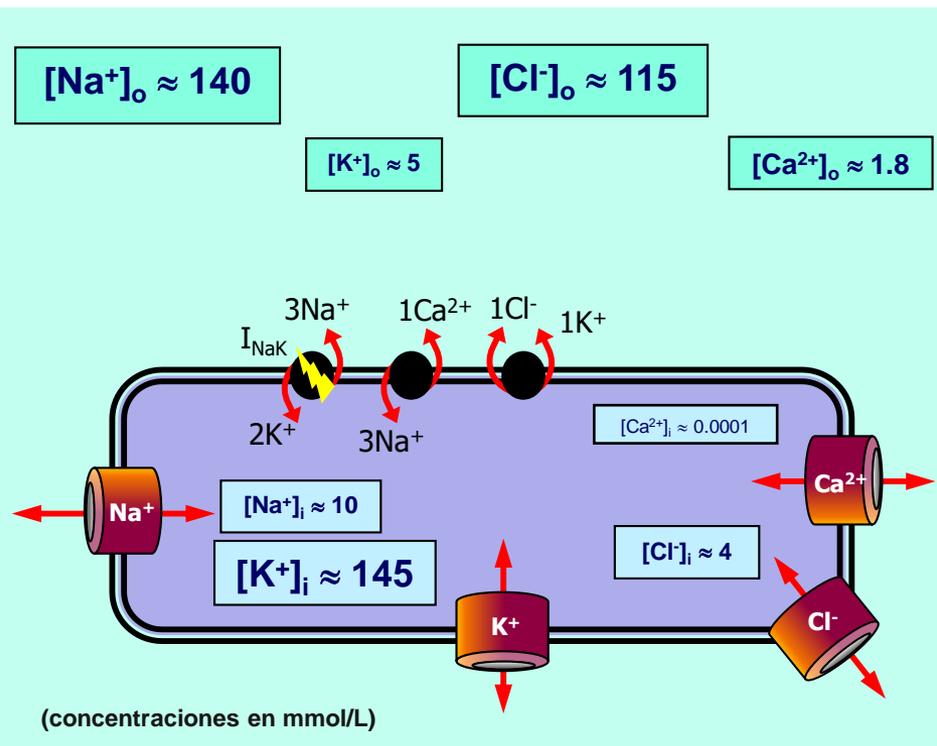
Canal Iónico



Gen



Corrientes iónicas: DIFUSIÓN y CAMPO ELÉCTRICO



corrientes generadas por $\left\{ \begin{array}{l} \text{DIFUSIÓN} \\ \text{CAMPO ELÉCTRICO} \end{array} \right.$

Canales Iónicos

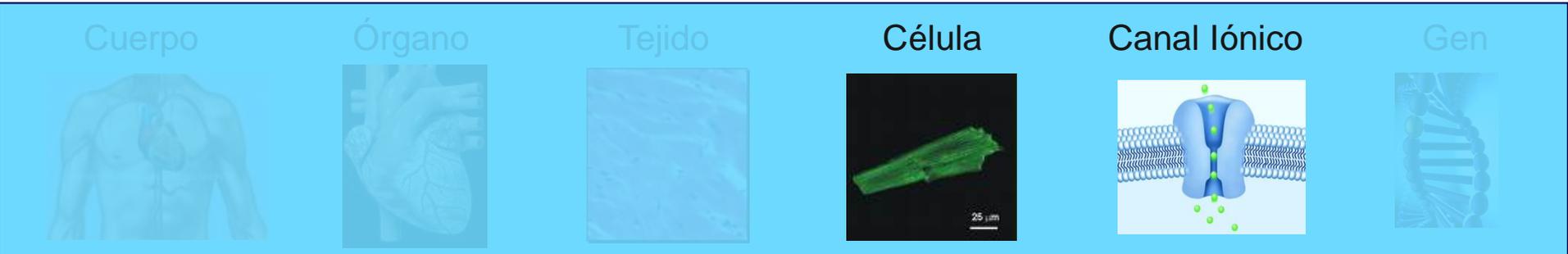
medio extracelular

membrana celular

medio intracelular

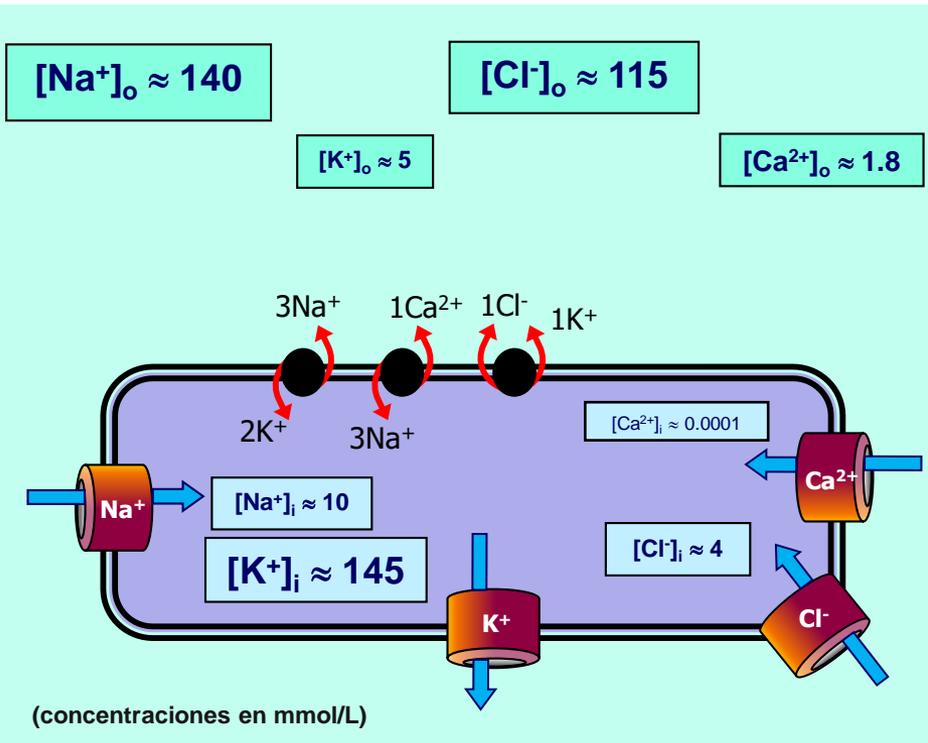
La mayoría de los canales iónicos son **ESPECÍFICOS** (dejan pasar una sola especie iónica)

Hay **MILES** de ellos en cada célula excitable



Corrientes iónicas por DIFUSIÓN

(supongamos que todos los canales iónicos están abiertos)



Canales Iónicos

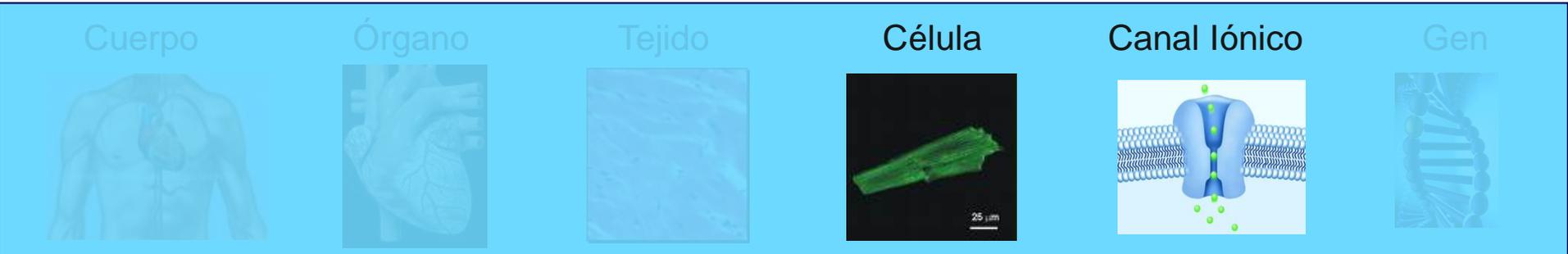
medio extracelular

membrana celular

medio intracelular

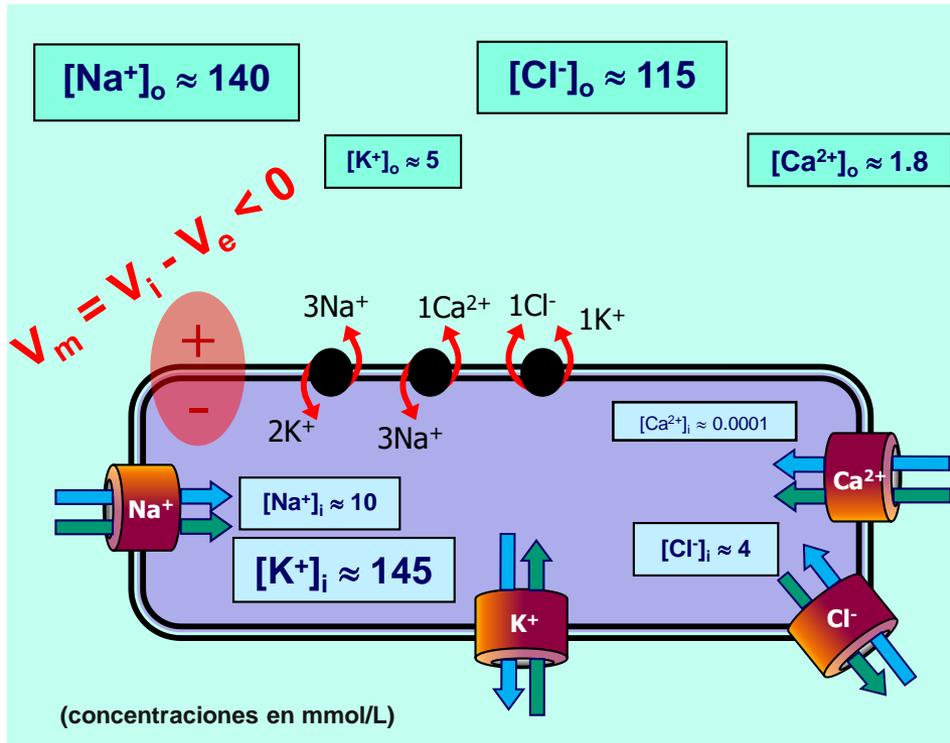
La mayoría de los canales iónicos son **ESPECÍFICOS** (dejan pasar una sola especie iónica)

Hay **MILES** de ellos en cada célula excitable



Corrientes iónicas por CAMPO ELÉCTRICO ($V_m < 0$)

(supongamos que todos los canales iónicos están abiertos)



Canales Iónicos

medio extracelular

membrana celular

medio intracelular

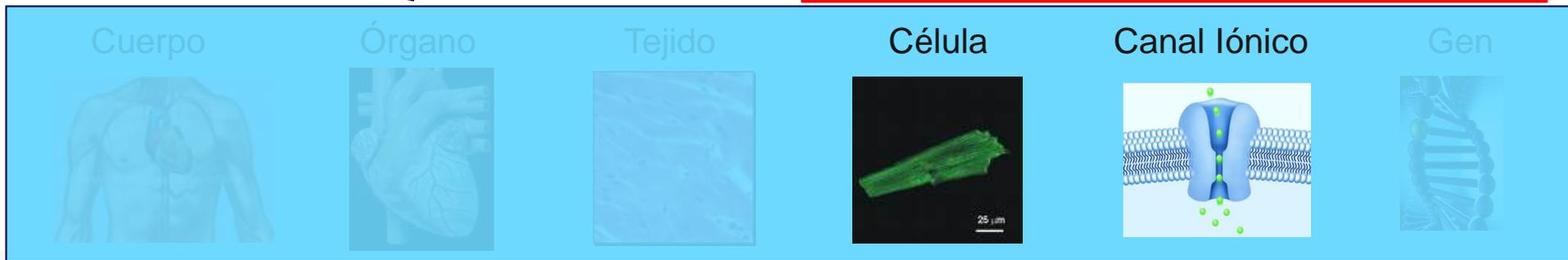
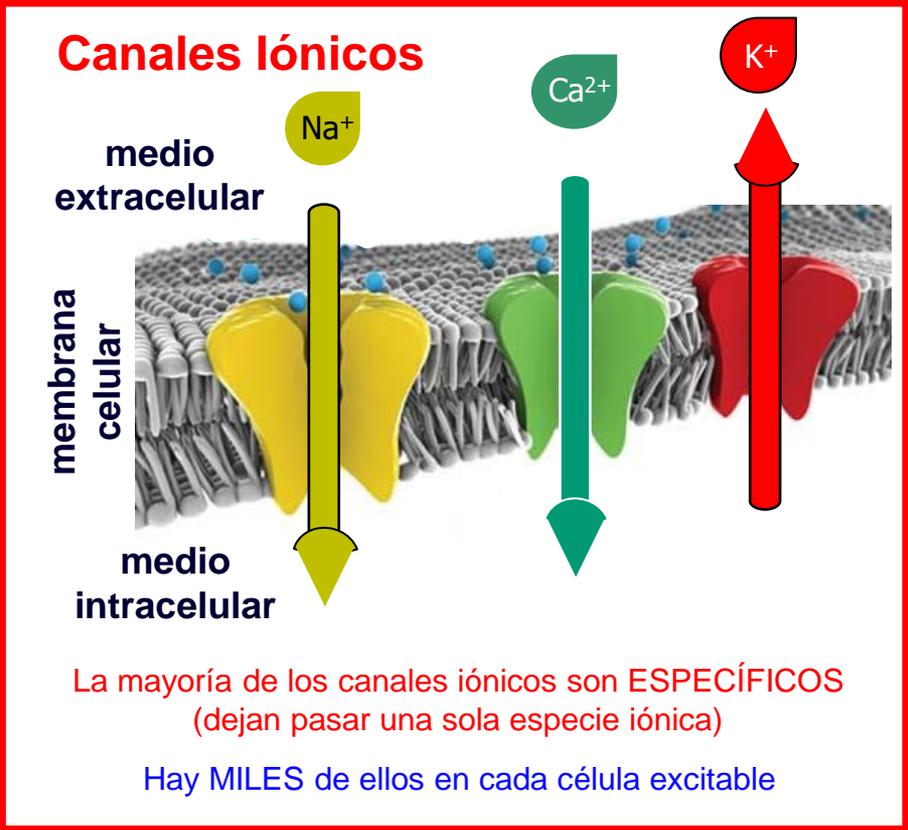
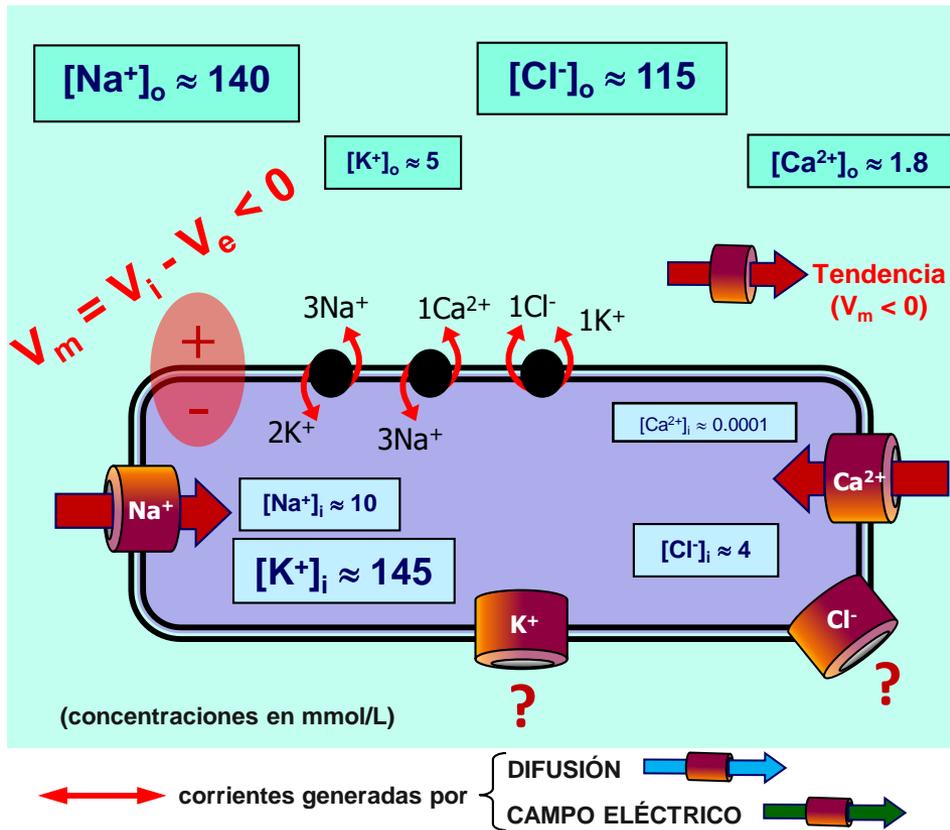
La mayoría de los canales iónicos son ESPECÍFICOS (dejan pasar una sola especie iónica)

Hay MILES de ellos en cada célula excitable



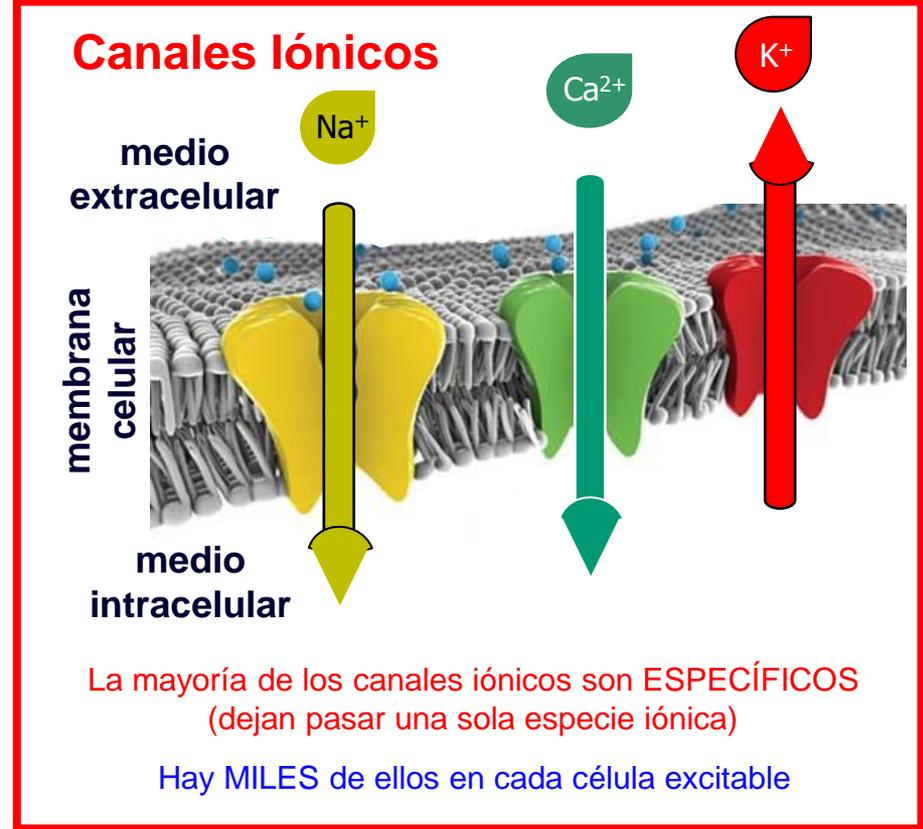
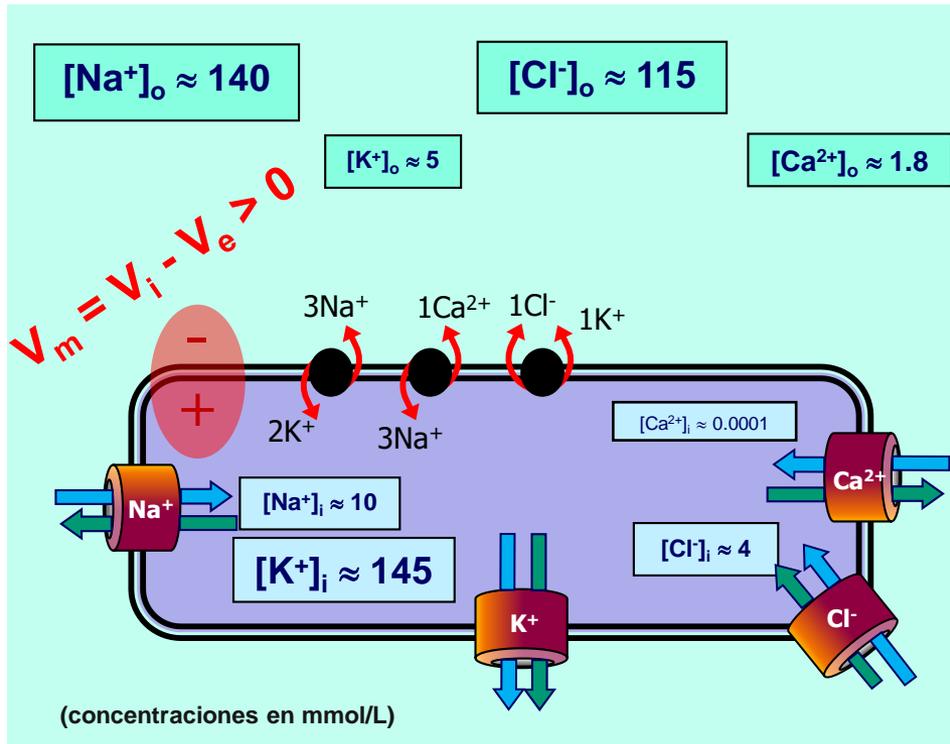
Corrientes iónicas NETAS ($V_m < 0$)

(supongamos que todos los canales iónicos están abiertos)



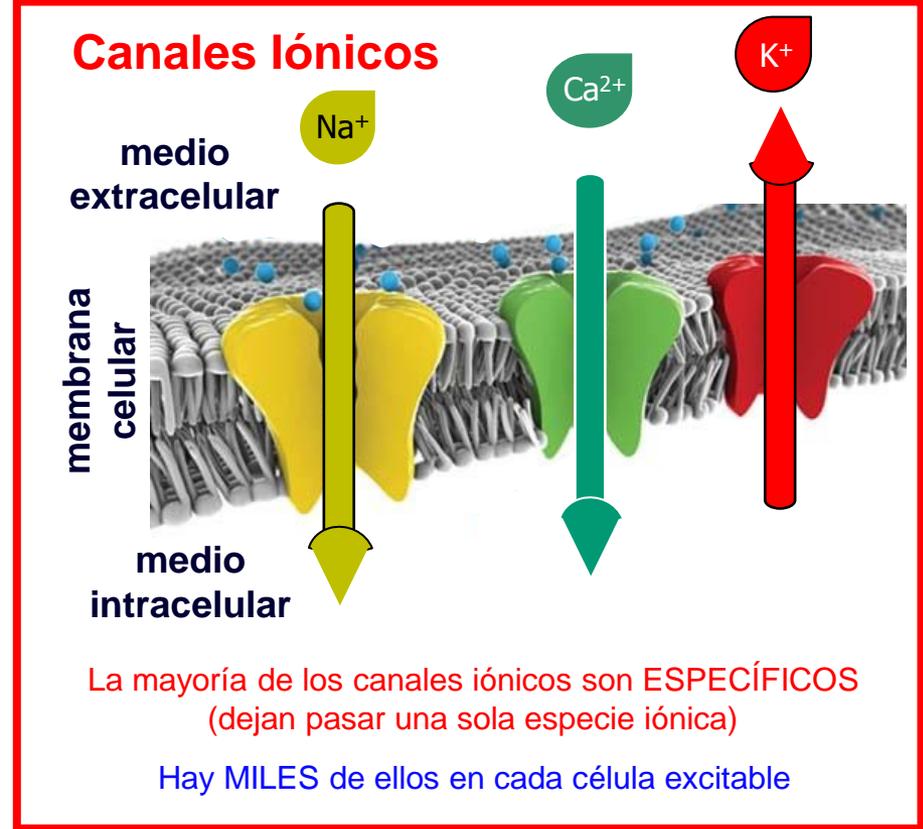
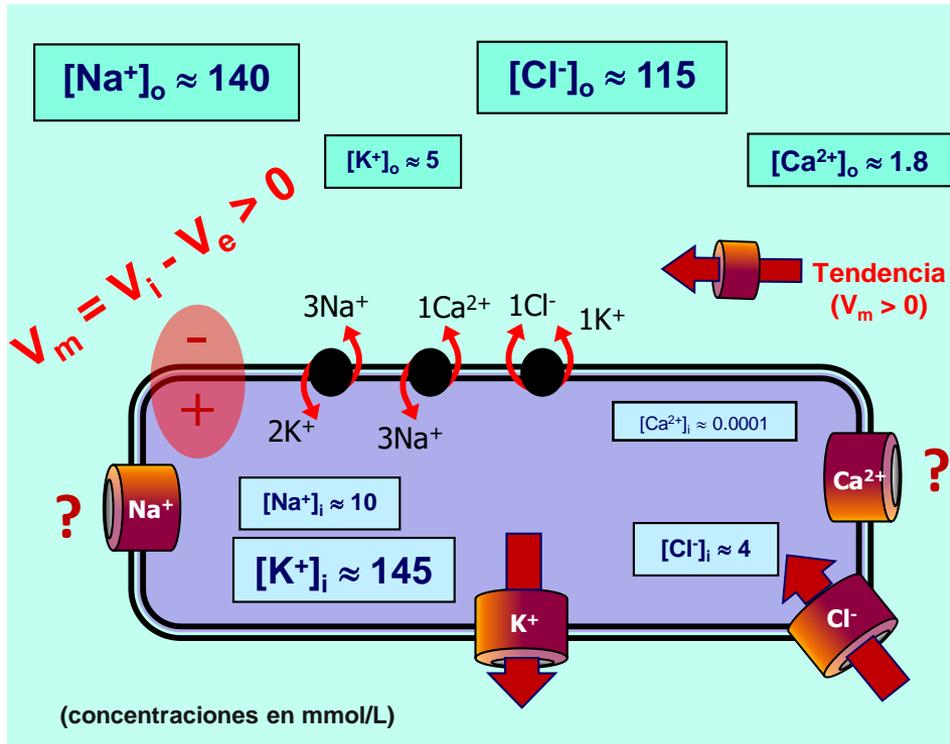
Corrientes iónicas por CAMPO ELÉCTRICO ($V_m < 0$)

(supongamos que todos los canales iónicos están abiertos)



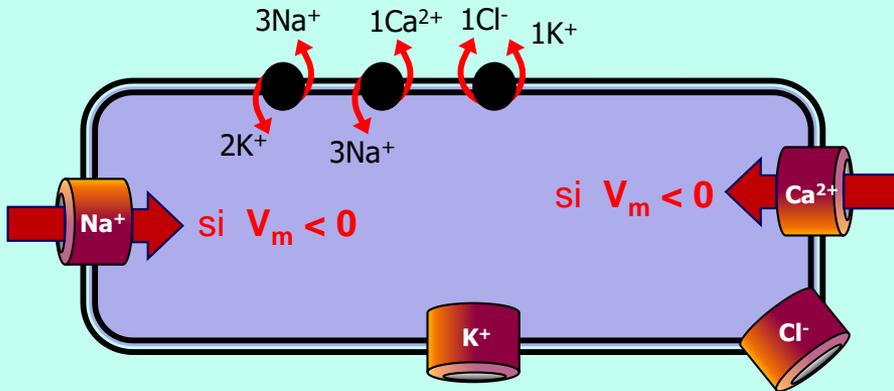
Corrientes iónicas NETAS ($V_m > 0$)

(supongamos que todos los canales iónicos están abiertos)

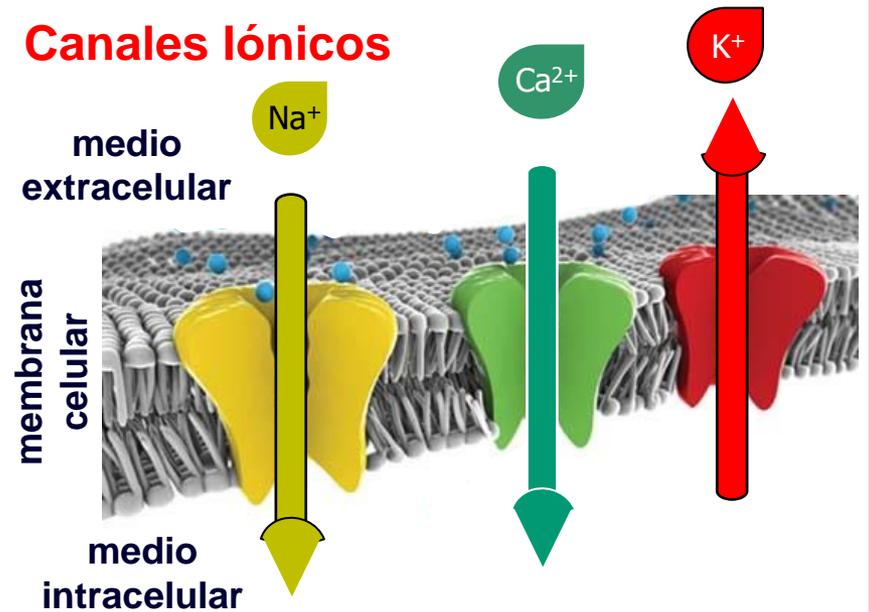


Corrientes iónicas NETAS (resumen)

RESUMEN DE TENDENCIAS



Canales Iónicos



La mayoría de los canales iónicos son **ESPECÍFICOS** (dejan pasar una sola especie iónica)

Hay **MILES** de ellos en cada célula excitable

Cuerpo



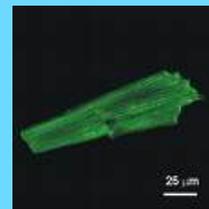
Órgano



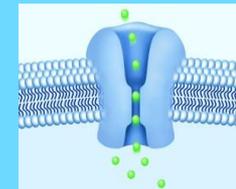
Tejido



Célula



Canal Iónico

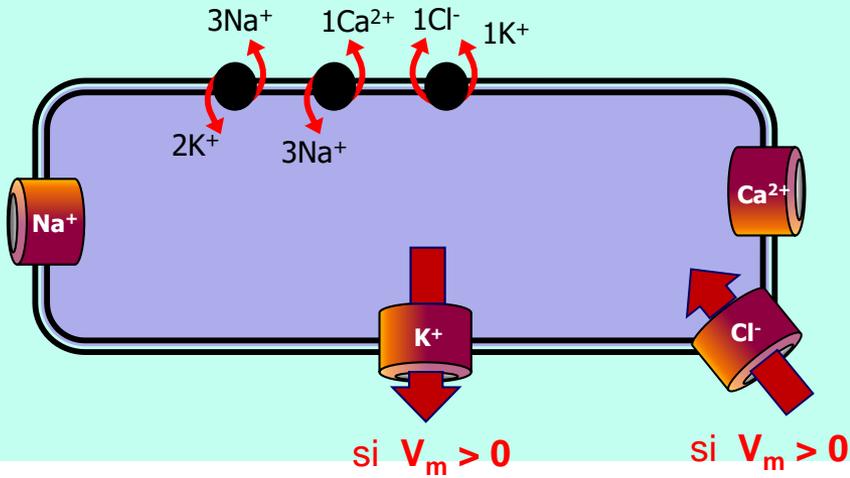


Gen

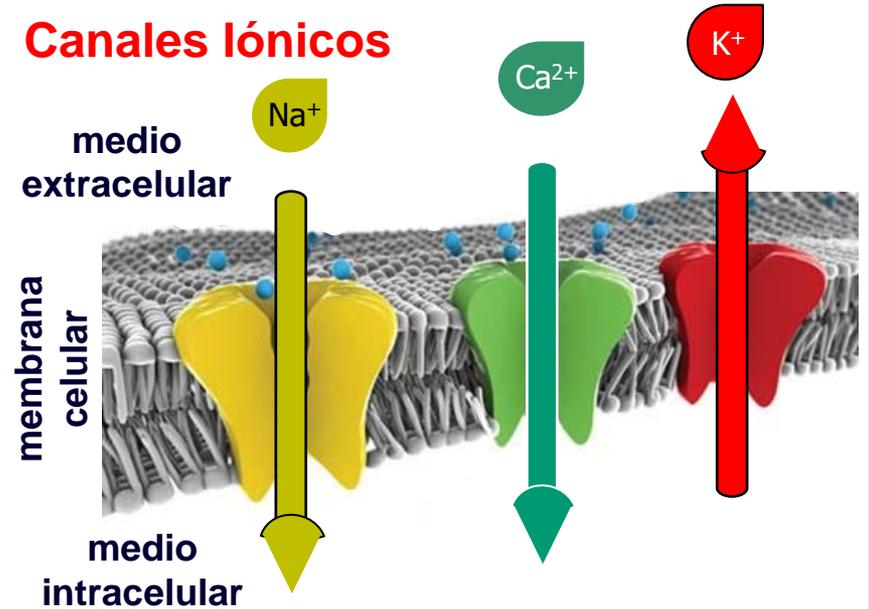


Corrientes iónicas NETAS (resumen)

RESUMEN DE TENDENCIAS



Canales Iónicos



La mayoría de los canales iónicos son ESPECÍFICOS (dejan pasar una sola especie iónica)

Hay MILES de ellos en cada célula excitable

Cuerpo



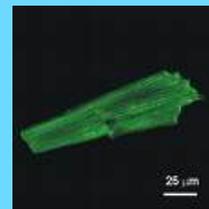
Órgano



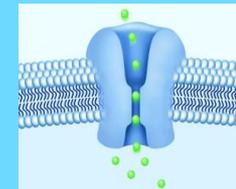
Tejido



Célula



Canal Iónico



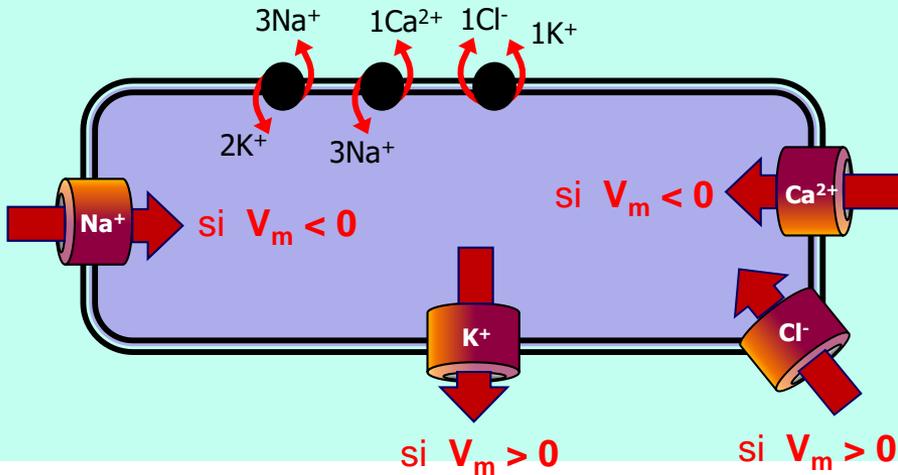
Gen



Corrientes iónicas NETAS (resumen)

RESUMEN DE TENDENCIAS

Las cuatro especies iónicas (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^-) tienen vías para entrar y salir de la célula



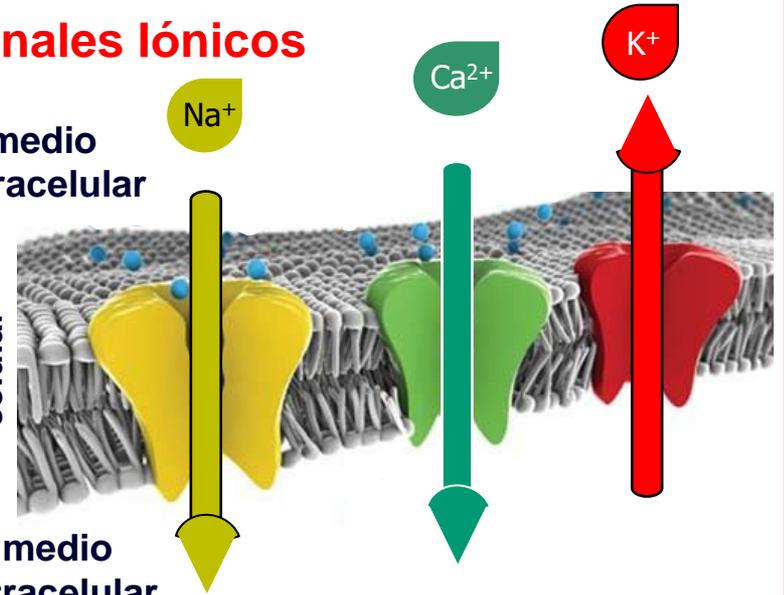
➡ EQUILIBRIO A LARGO PLAZO

Canales Iónicos

medio extracelular

membrana celular

medio intracelular



La mayoría de los canales iónicos son ESPECÍFICOS (dejan pasar una sola especie iónica)

Hay MILES de ellos en cada célula excitable

Cuerpo



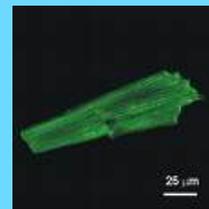
Órgano



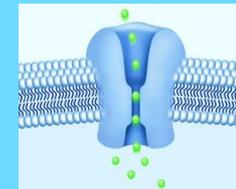
Tejido



Célula



Canal Iónico



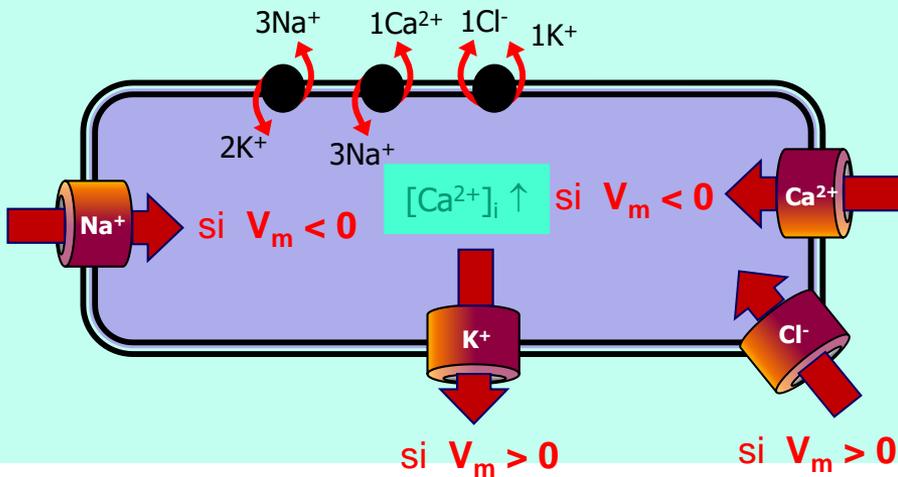
Gen



Corrientes iónicas y potencial de acción

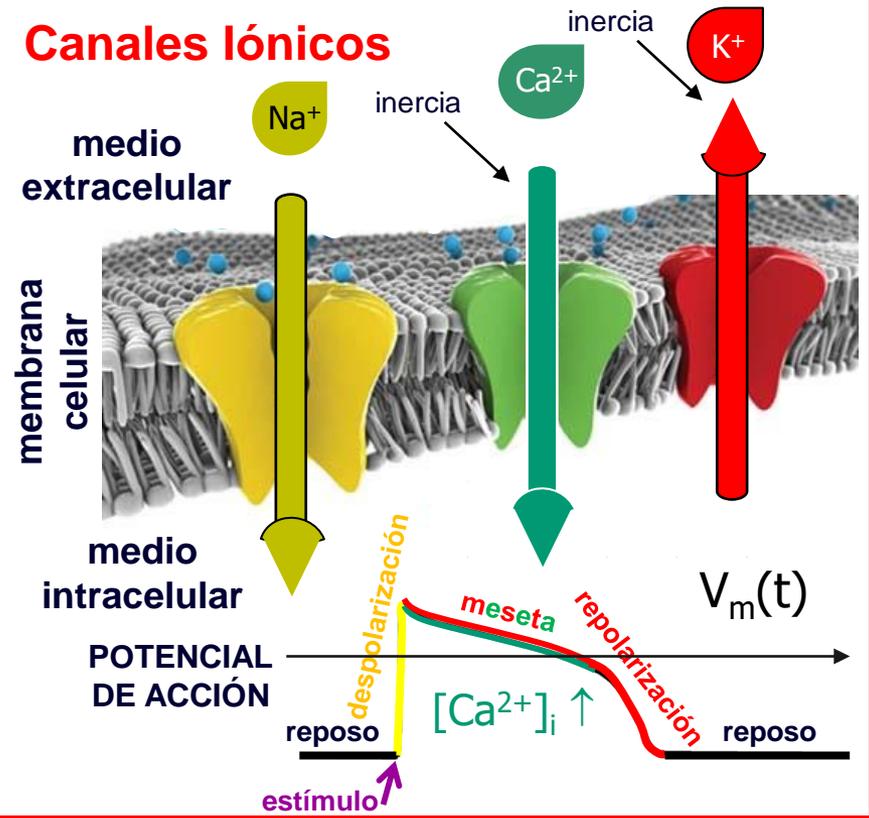
RESUMEN DE TENDENCIAS

Las cuatro especies iónicas (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^-) tienen vías para entrar y salir de la célula



➡ EQUILIBRIO A LARGO PLAZO

Canales Iónicos



Cuerpo

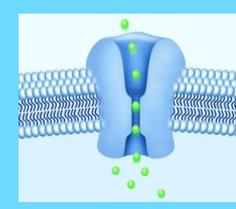
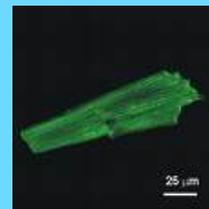
Órgano

Tejido

Célula

Canal Iónico

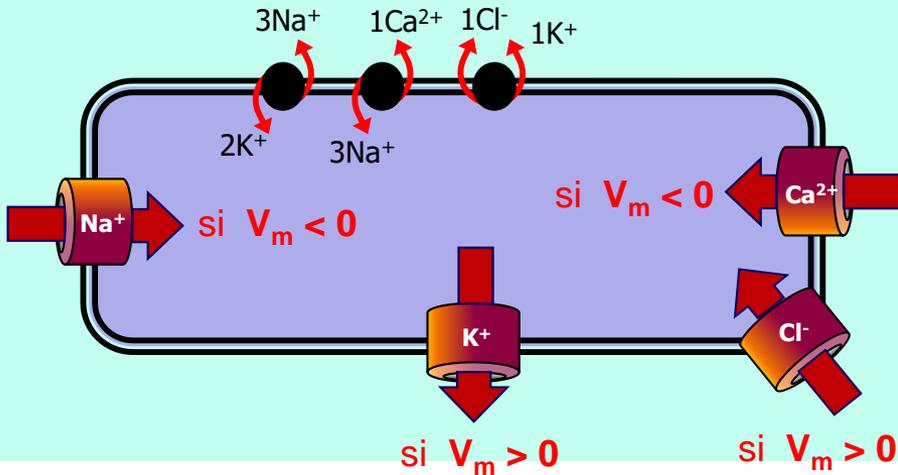
Gen



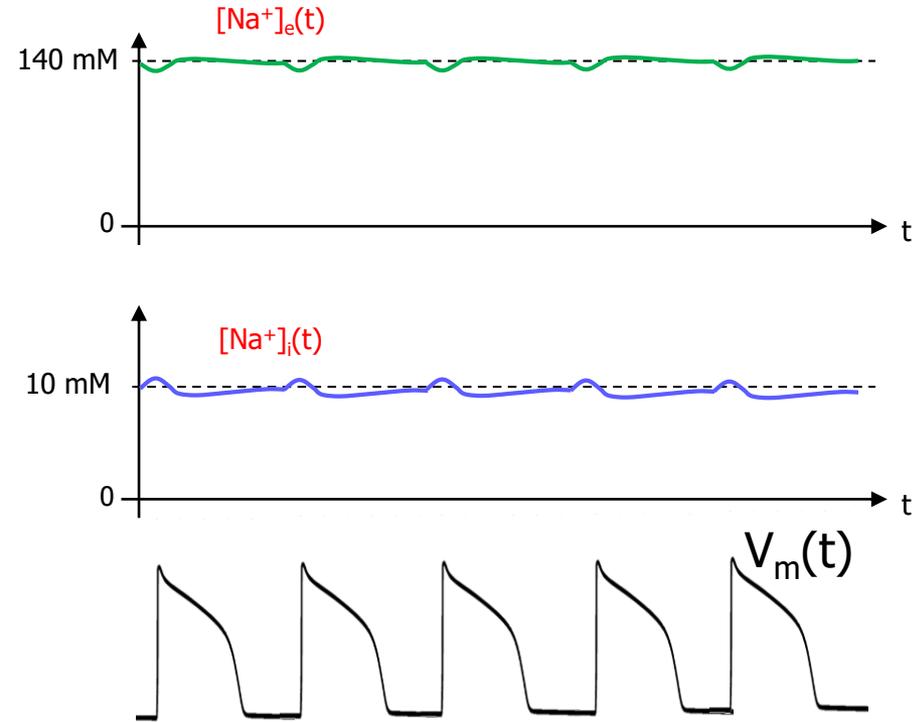
Concentraciones iónicas: homeostasis

RESUMEN DE TENDENCIAS

Las cuatro especies iónicas (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^-) tienen vías para entrar y salir de la célula



EQUILIBRIO A LARGO PLAZO



Cuerpo



Órgano



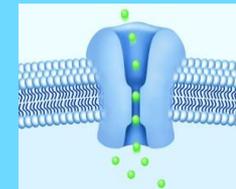
Tejido



Célula



Canal Iónico



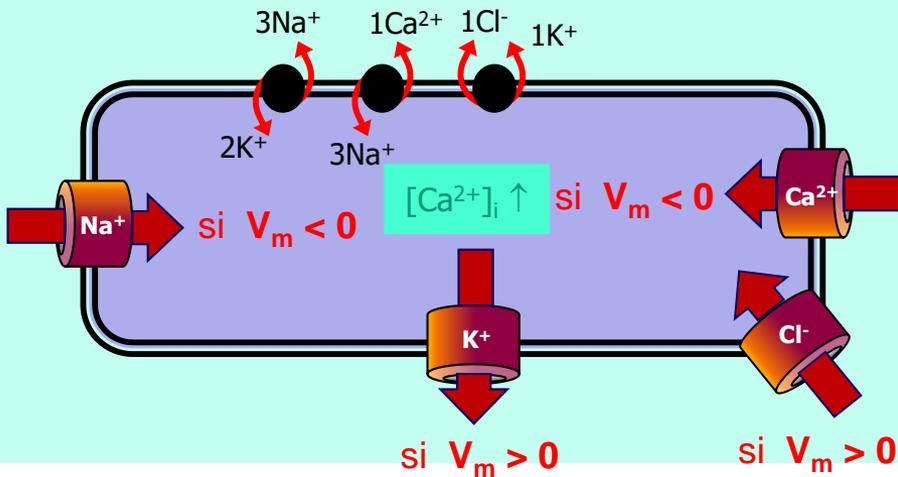
Gen



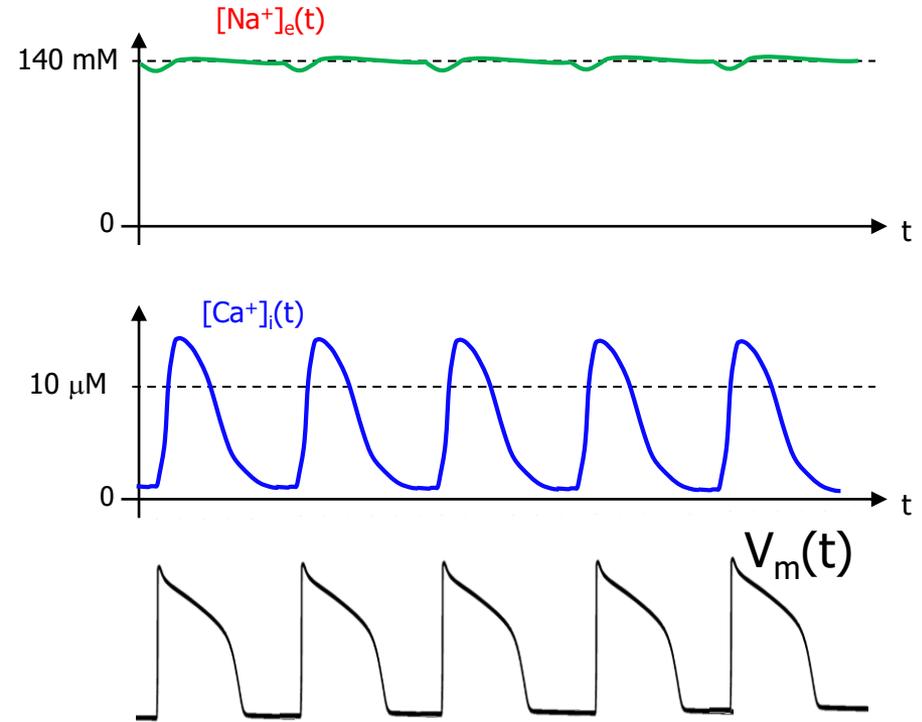
Concentraciones iónicas: los transitorios de calcio

RESUMEN DE TENDENCIAS

Las cuatro especies iónicas (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^-) tienen vías para entrar y salir de la célula



EQUILIBRIO A LARGO PLAZO



Cuerpo



Órgano



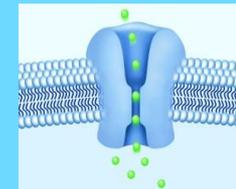
Tejido



Célula



Canal Iónico



Gen



Conclusiones

- La membrana celular es eléctricamente aislante.
- Los iones pueden atravesar la membrana circulando a través de canales iónicos, intercambiadores, co-transportadores y bombas, que son proteínas incrustadas en ella y constituyen **mecanismos de conducción iónica a través de la membrana celular**.
- El **potencial de membrana** (V_m) se define como el **potencial intracelular menos el potencial extracelular** (es decir, como el potencial intracelular medido respecto al medio extracelular). La **corriente iónica saliente** de la célula se considera **positiva**.
- Los mecanismos de conducción iónica pueden ser **activos** o **pasivos** según necesiten (o no) del aporte de energía externa para funcionar. Los canales iónicos, los intercambiadores y los co-transportadores son mecanismos pasivos; las bombas son mecanismos activos.
- Las bombas, los intercambiadores y los co-transportadores se encargan de establecer y mantener **gradientes de concentración** de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Cl^- a través de la membrana.
- Los **canales iónicos** poseen un **poro central** a través del cual pueden circular los iones de manera selectiva, siempre que el canal iónico esté en estado abierto.
- Las fuerzas que impulsan a los iones a través de los canales iónicos son de dos tipos: de **difusión** (debido a la diferencia de concentraciones de los iones a través de la membrana) y de **campo eléctrico** (debido a la existencia de un potencial de membrana).
- El sentido de las **fuerzas de difusión** nunca cambia a lo largo de la vida de la célula: empujan al Na^+ , Ca^{2+} y Cl^- hacia adentro y al K^+ hacia afuera. Eso es así porque las concentraciones de los iones apenas cambian en el tiempo (salvo la del calcio intracelular...)
- El sentido de las **fuerzas de campo eléctrico** cambia alternativamente durante cada potencial de acción.
- La resultante de ambas fuerzas genera las siguientes **tendencias de movimiento** en los iones: **el Na^+ y el Ca^{2+} tienden a entrar** en la célula durante el estado de reposo y al principio del potencial de acción, mientras que **el K^+ tiende a salir** de la célula en la fase intermedia del potencial de acción.
- La **bomba Na^+/K^+** extrae tres iones de Na^+ de la célula e introduce dos iones de K^+ , en ambos casos en contra del gradiente de concentración. Por ello, necesita energía, que extrae de la desfosforilación del ATP. **Es el mecanismo básico de extracción de Na^+ e introducción de K^+ de la célula.**
- El **intercambiador $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$** extrae un ion de Ca^{2+} de la célula e introduce tres iones de Na^+ . Para mover el Ca^{2+} en contra de su gradiente de difusión aprovecha el gradiente de concentración favorable del Na^+ . Por ello, no necesita energía externa. **Es el mecanismo básico de extracción de Ca^{2+} de la célula.**
- El **co-transportador K^+/Cl^-** extrae un ion de K^+ y uno de Ca^{2+} de la célula. Para mover el Cl^- en contra de su gradiente de difusión aprovecha el gradiente de concentración favorable del K^+ . Por ello, no necesita energía externa. **Es el mecanismo básico de extracción de Cl^- de la célula.**

Bibliografía

- Electrofisiología básica de la membrana celular
 - Capítulo 3 de [1] (especialmente punto 3.9)
 - Capítulo 2 de [2] (especialmente punto 2.2.2)
 - Capítulo 3 de [3] (especialmente puntos 3.1 y 3.2)
- Mecanismos de transporte iónico y concentraciones iónicas
 - Capítulo 3 de [1]
 - Capítulo 3 de [2] (especialmente punto 3.5)
 - Capítulo 2 de [3]
- Ecuaciones del transporte iónico por difusión y campo eléctrico
 - Capítulo 3 de [1] (especialmente punto 3.2 a 3.8)
 - Capítulo 3 de [2] (especialmente punto 3.2 y 3.4)
 - Capítulo 2 de [3] (especialmente punto 2.3 y 2.4)
- Potencial de equilibrio
 - Capítulo 3 de [1] (especialmente punto 3.13)
 - Capítulo 3 de [2] (especialmente punto 3.2.4)
 - Capítulo 2 de [3] (especialmente punto 2.5)
- Circuito eléctrico equivalente de un canal iónico y de la membrana celular
 - Capítulo 3 de [1] (especialmente punto 3.13)
 - Capítulo 3 de [2] (especialmente punto 3.4)
 - Capítulo 4 de [3] (especialmente punto 4.3)

[1] Bioelectricity. A quantitative approach. R Plonsey & R Barr. Ed. Springer, 2007

[2] Bioelectromagnetism. J Malmivuo & R Plonsey. Ed. Oxford University Press, 1995

[3] Bioelectrónica. Señales bioeléctricas. JM Ferrero, JM Ferrero, J Saiz & A Arnau Ed. SP-UPV, 1994

