

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología  
Centro de Investigación en Matemáticas, A.C.

## Estimaciones de la Tasa de Reproducción Efectiva $R_t$ de COVID-19 para los Estados y Zonas Metropolitanas de México

20 de Abril de 2022

Reporte realizado por:

- Dra. Graciela González Farías
- M.en C. Domingo Iván Rodríguez González
- Dr. Norberto Alejandro Hernández Leandro



CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATEMÁTICAS, A.C.

*20 de Abril de 2022*

# Tabla de Contenidos

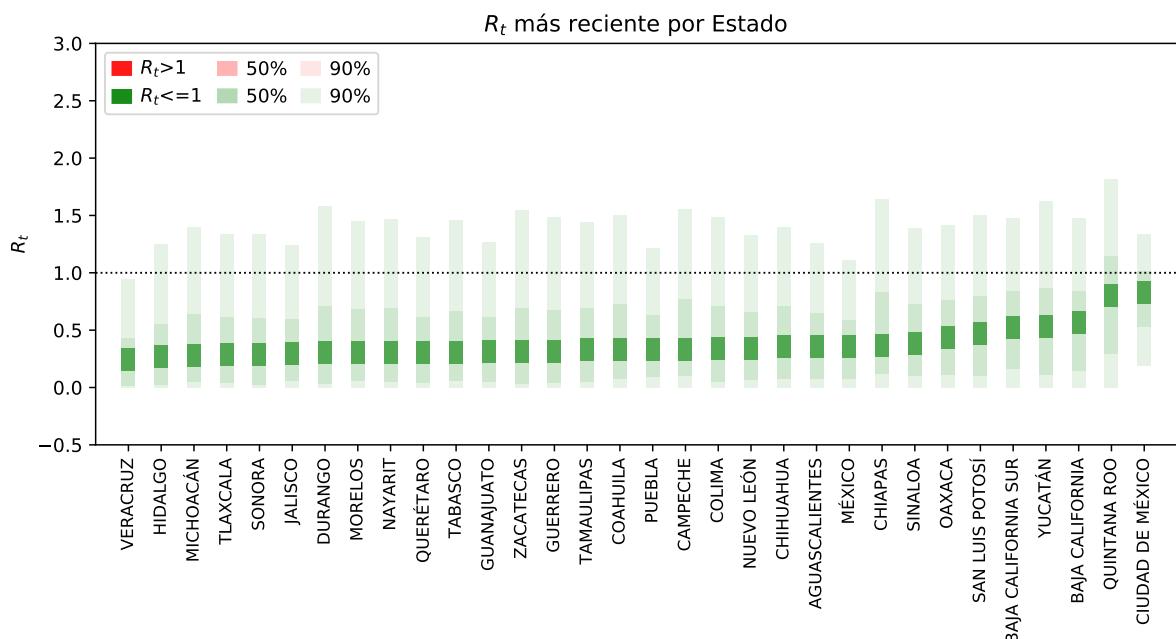
<b>1</b>	<b>Estimaciones de <math>R_t</math> en Orden Ascendente .....</b>	<b>4</b>
1.1	Estimaciones de $R_t$ por Estado en Orden Ascendente	5
1.2	Estimaciones de $R_t$ por Zona Metropolitana en Orden Ascendente	6
<b>2</b>	<b>Estimaciones de <math>R_t</math> por Estado .....</b>	<b>7</b>
2.1	Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Estado	19
<b>3</b>	<b>Estimaciones de <math>R_t</math> por Zona Metropolitana .....</b>	<b>20</b>
3.1	Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Zona Metropolitana	30
<b>4</b>	<b>Metodología de Estimación de <math>R_t</math> .....</b>	<b>31</b>
4.1	Metodología para la Estimación del $R_t$ .	32
4.1.1	Datos de entrada para la estimación .....	32
4.1.2	Estimación de la tasa de reproducción efectiva $R_t$ .....	32

## **1. Estimaciones de $R_t$ en Orden Ascendente**

## 1.1 Estimaciones de $R_t$ por Estado en Orden Ascendente

**Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 20 de Abril de 2022**

La figura 1.1 muestra las estimaciones del  $R_t$  para los 32 estados de México, ordenados de manera ascendente. Se tomaron los datos de nuevos casos hasta el día 08 de Abril de 2022. En verde se muestran los estados para los que el  $R_t$  estimado es menor a 1. Se incluyen los intervalos de máxima densidad del 50 % y 90 %.

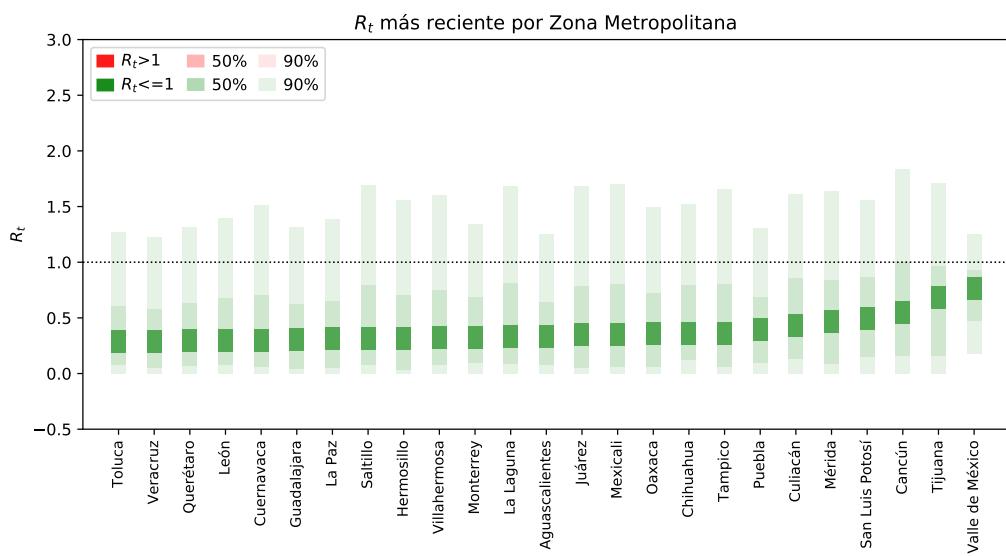


**Fig. 1.1:** Valor de  $R_t$  más reciente para los 32 estados de México.

## 1.2 Estimaciones de $R_t$ por Zona Metropolitana en Orden Ascendente

**Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 20 de Abril de 2022**

La figura 1.2 muestra las estimaciones del  $R_t$  para las 25 Zonas Metropolitanas con mayor número de casos confirmados de COVID-19, ordenadas de manera ascendente. Se tomaron los datos de nuevos casos hasta el día 08 de Abril de 2022. En verde se muestran las zonas metropolitanas para las que el  $R_t$  estimado es menor a 1. Se incluyen los intervalos de máxima densidad del 50 % y 90 %.



**Fig. 1.2:** Valor de  $R_t$  más reciente para las 25 Zonas Metropolitanas con mayor número de casos.

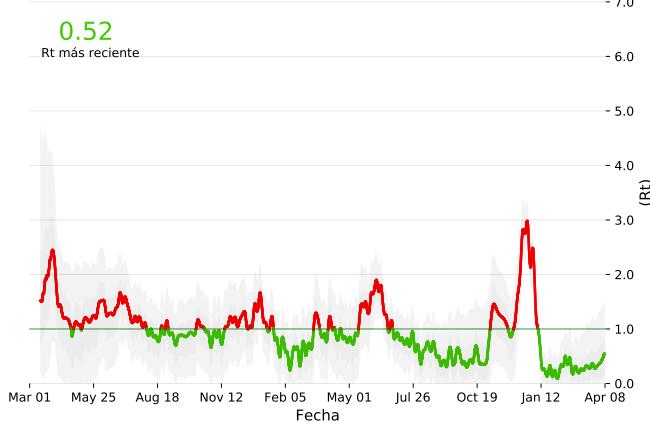
## **2. Estimaciones de $R_t$ por Estado**

**Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 20 de Abril de 2022**

A continuación se muestran las gráficas del comportamiento de la tasa  $R_t$  a lo largo del tiempo para los 32 estados de México. La fecha inicial se toma a partir de la cual existen datos suficientes para hacer la estimación, mientras que la fecha final corresponde al 08 de Abril de 2022.

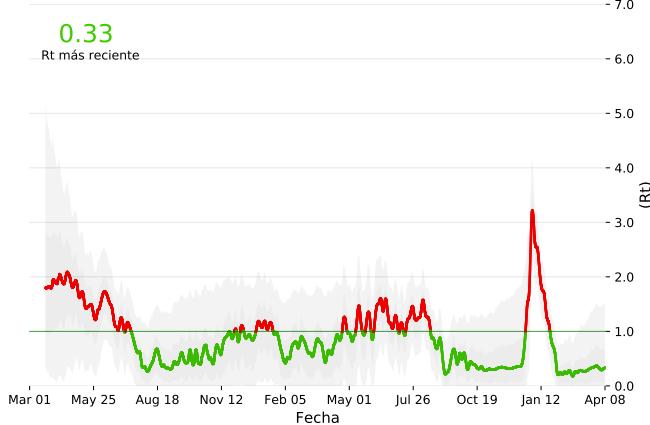


### BAJA CALIFORNIA SUR



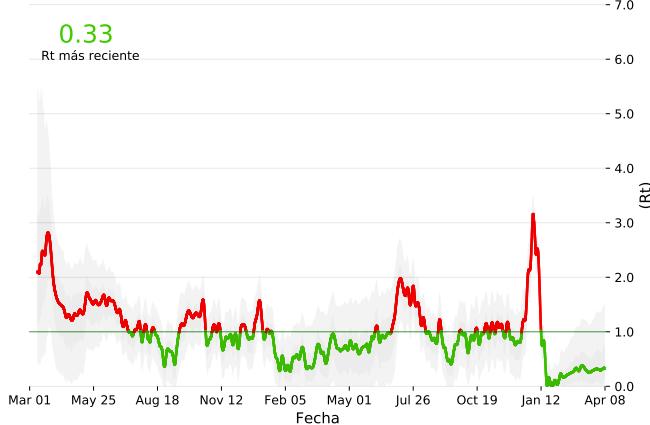
103595 casos totales  
2684 defunciones totales  
2020-03-18 fecha de inicio  
12873.61 casos por 100mil habitantes  
1.81 % de casos a nivel nacional

### CAMPECHE

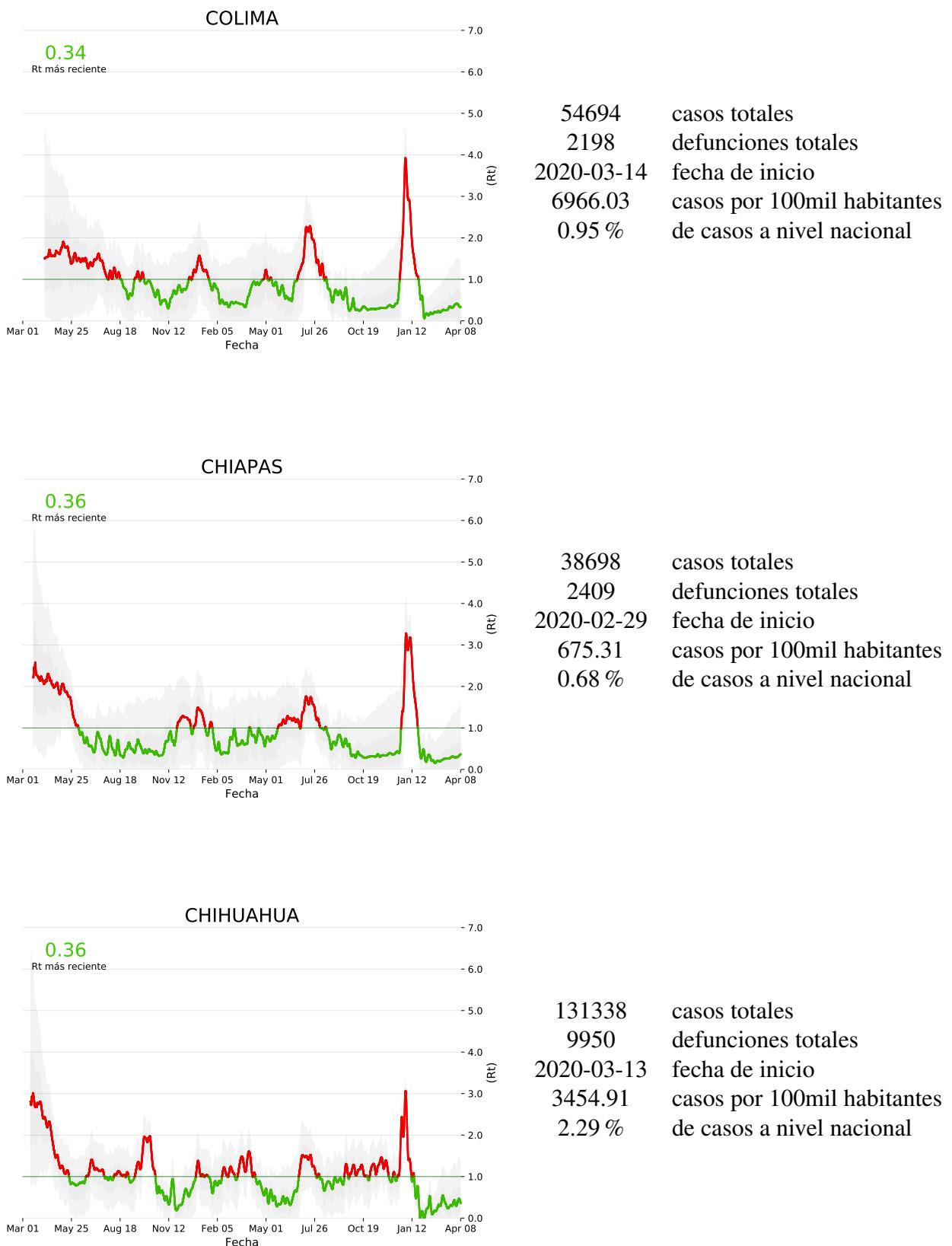


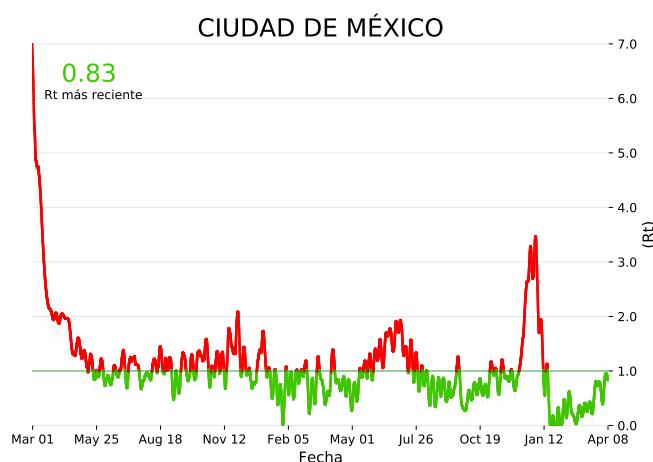
34044 casos totales  
2240 defunciones totales  
2020-03-08 fecha de inicio  
3402.30 casos por 100mil habitantes  
0.59 % de casos a nivel nacional

### COAHUILA

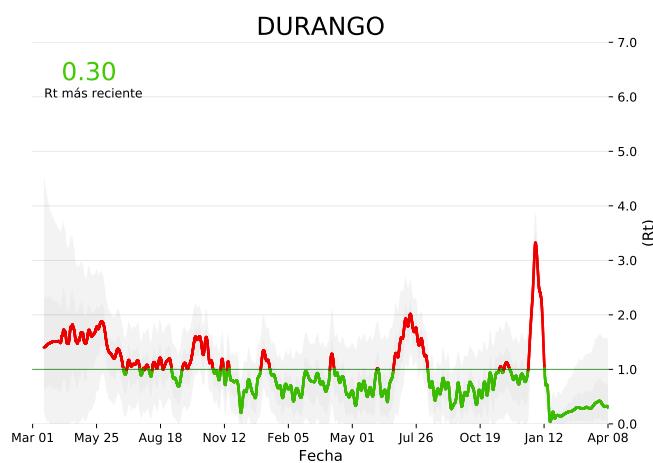


145452 casos totales  
8783 defunciones totales  
2020-02-28 fecha de inicio  
4518.94 casos por 100mil habitantes  
2.54 % de casos a nivel nacional

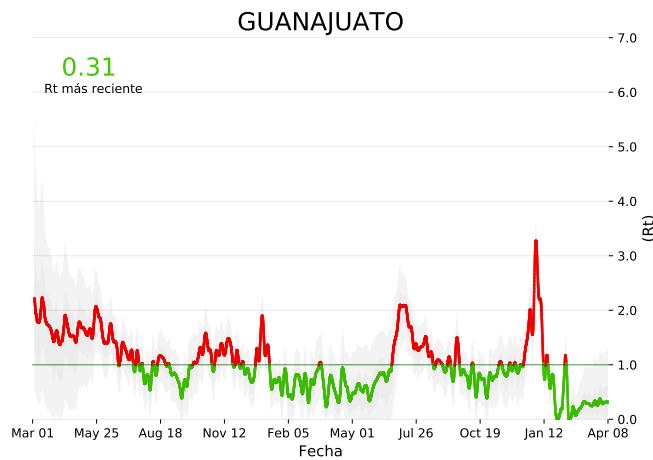




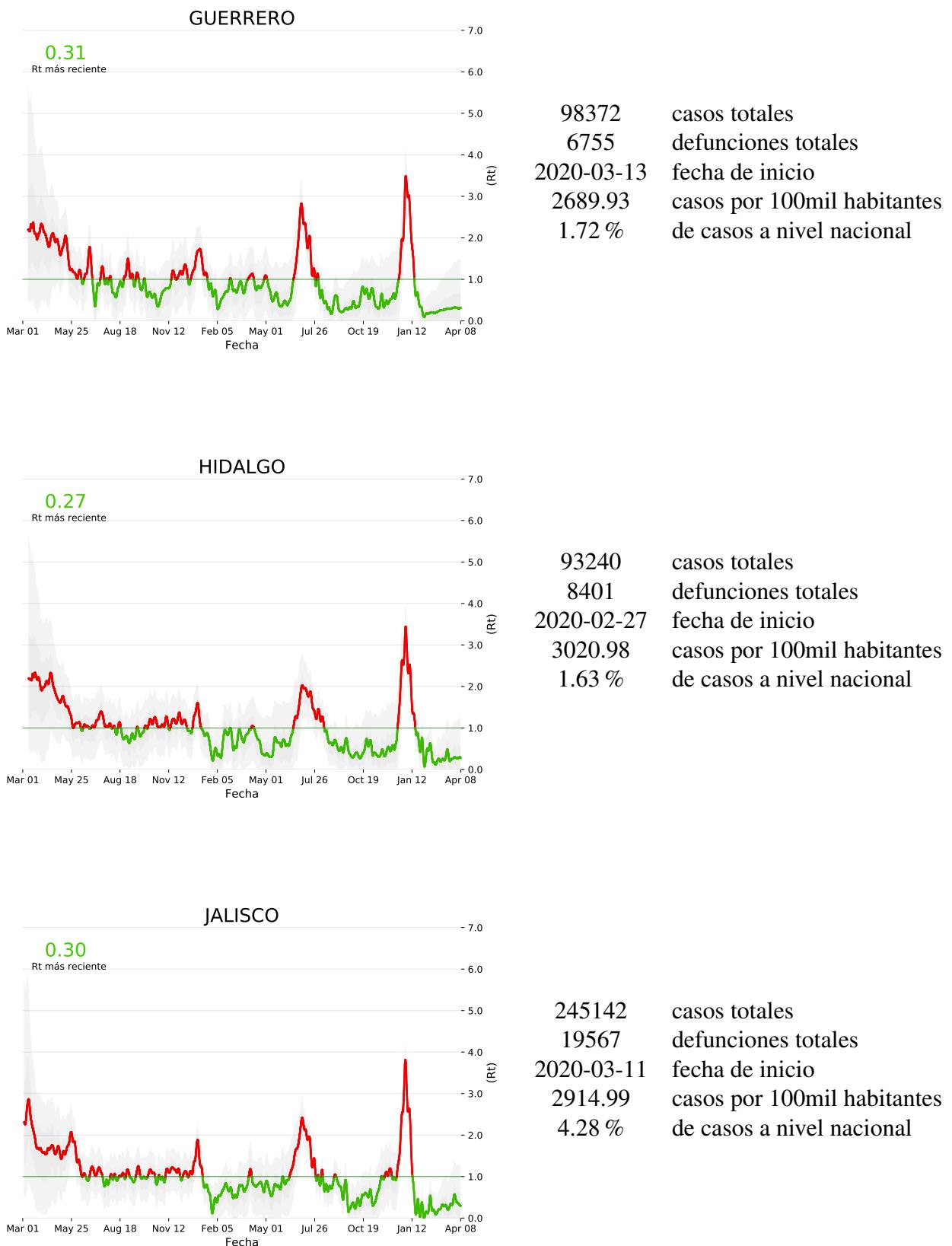
1394311      casos totales  
 42755      defunciones totales  
 2020-02-27      fecha de inicio  
 15460.32      casos por 100mil habitantes  
 24.33 %      de casos a nivel nacional

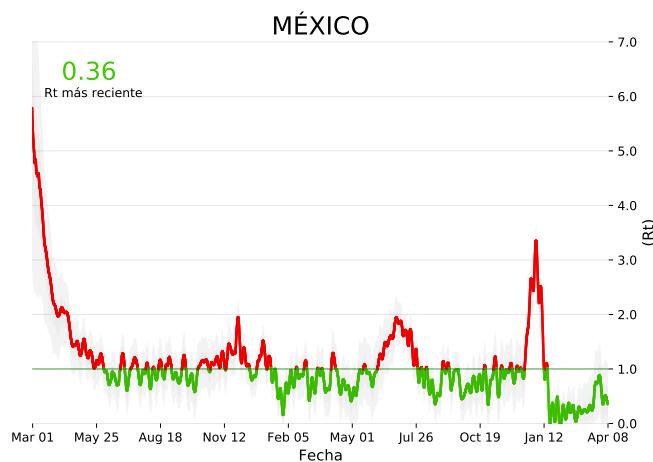


68185      casos totales  
 3600      defunciones totales  
 2020-03-11      fecha de inicio  
 3648.22      casos por 100mil habitantes  
 1.19 %      de casos a nivel nacional

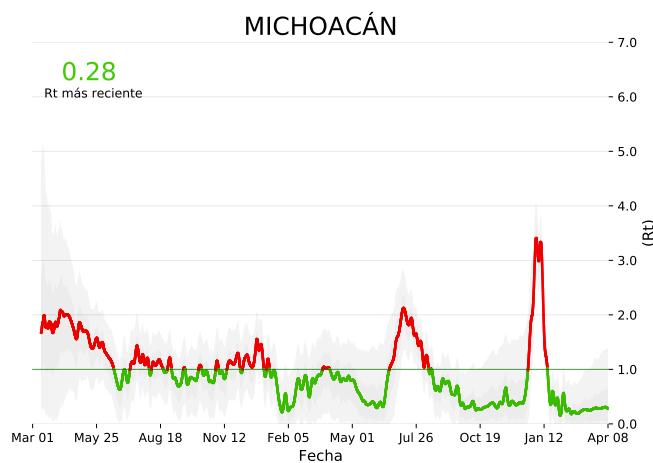


281953      casos totales  
 14877      defunciones totales  
 2020-03-01      fecha de inicio  
 4527.06      casos por 100mil habitantes  
 4.92 %      de casos a nivel nacional

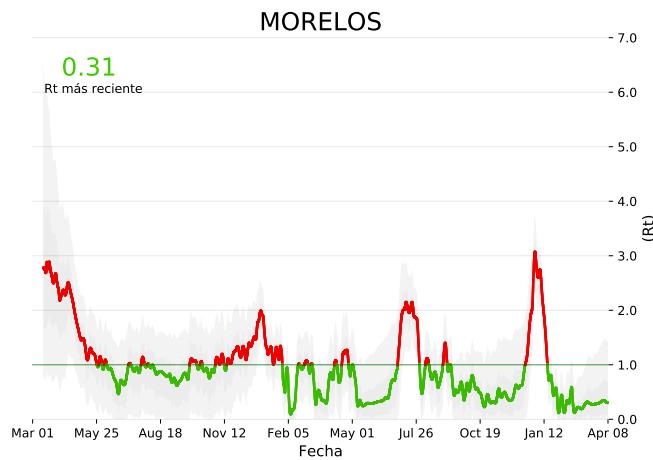




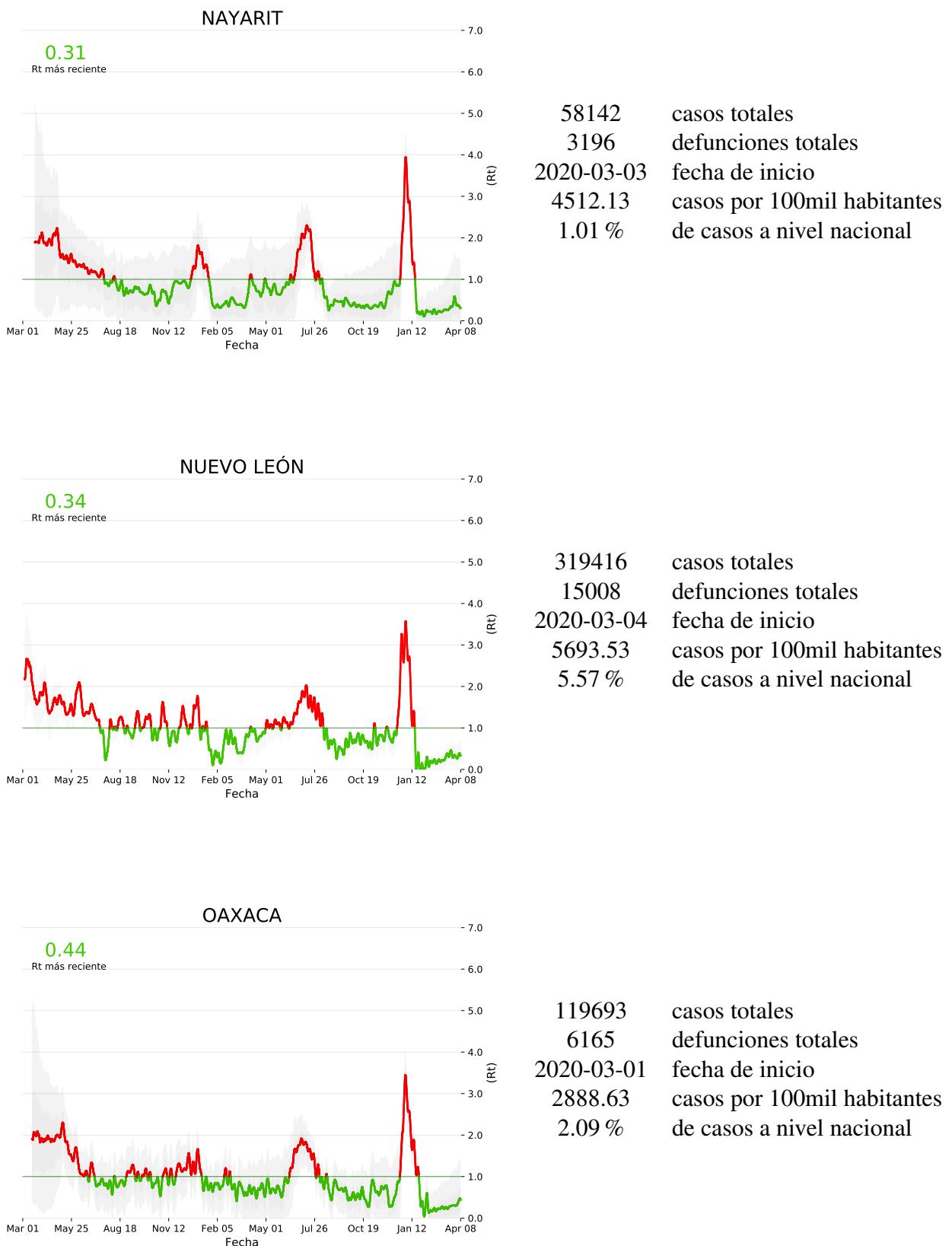
571356      casos totales  
 47177      defunciones totales  
 2020-02-27    fecha de inicio  
 3278.42     casos por 100mil habitantes  
 9.97 %      de casos a nivel nacional

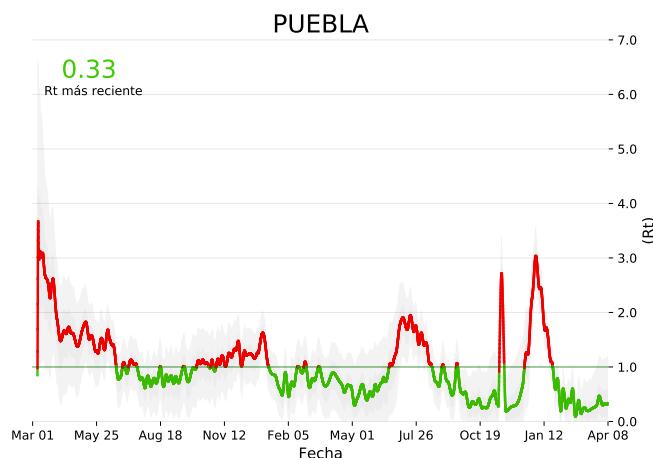


94065      casos totales  
 8822       defunciones totales  
 2020-03-18   fecha de inicio  
 1949.37     casos por 100mil habitantes  
 1.64 %      de casos a nivel nacional

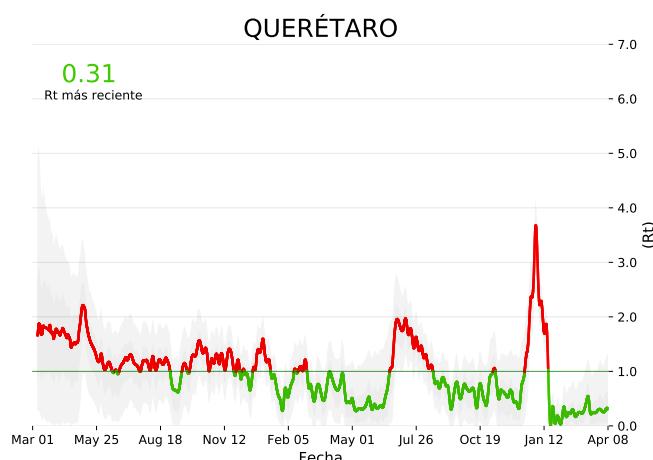


70049      casos totales  
 5267       defunciones totales  
 2020-03-09   fecha de inicio  
 3426.96     casos por 100mil habitantes  
 1.22 %      de casos a nivel nacional

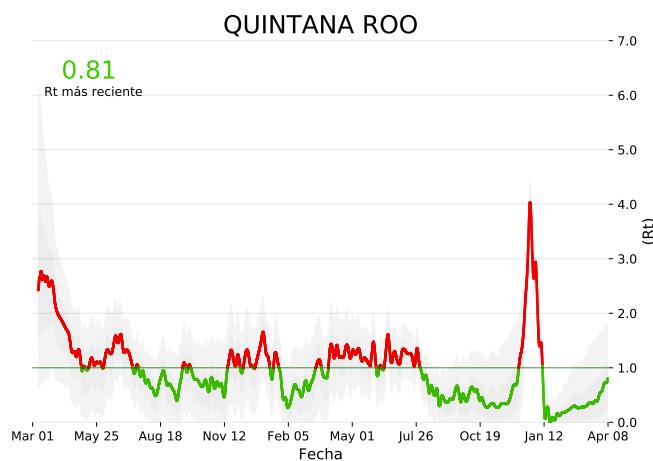




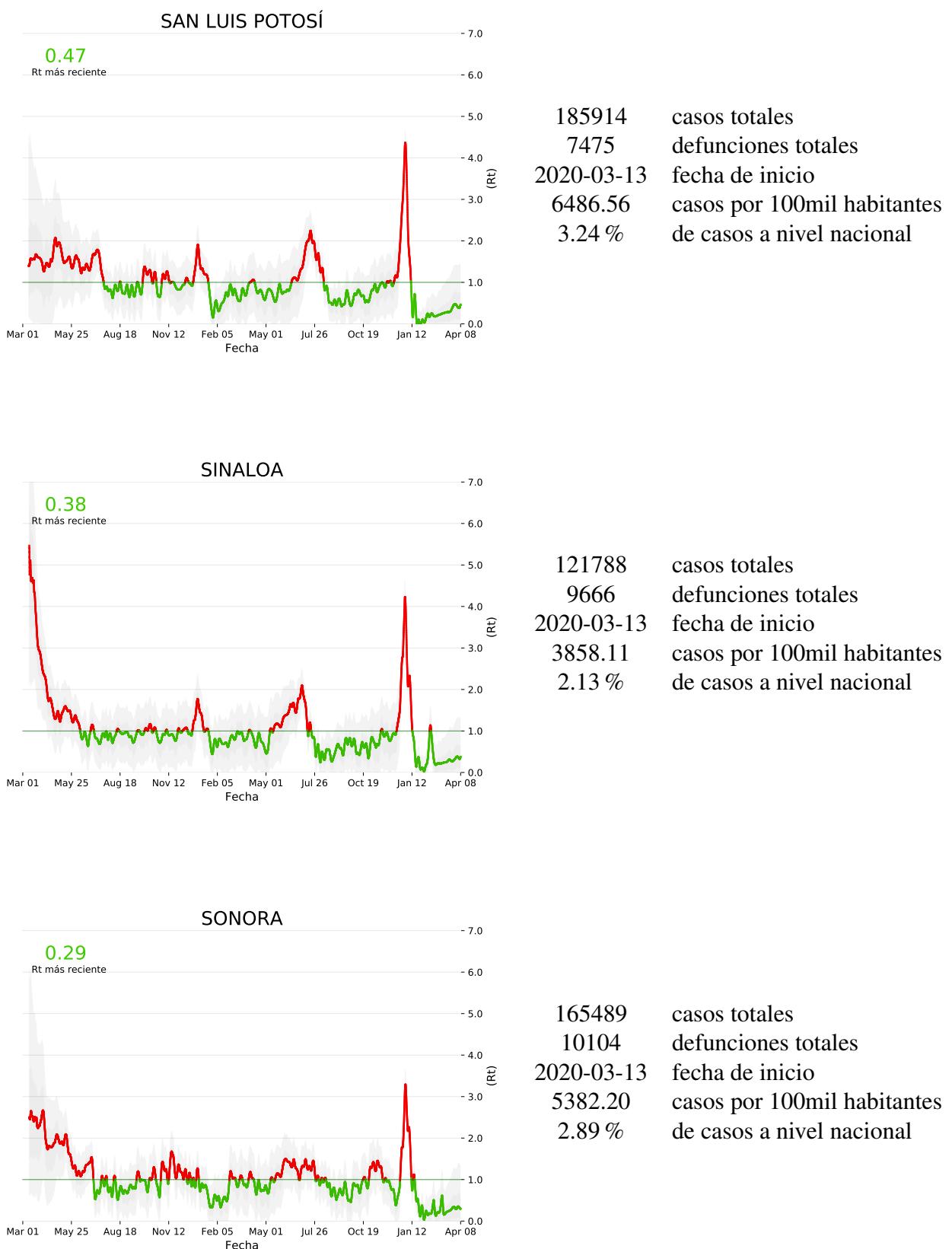
169418      casos totales  
 16453      defunciones totales  
 2020-03-11    fecha de inicio  
 2565.21     casos por 100mil habitantes  
 2.96 %      de casos a nivel nacional

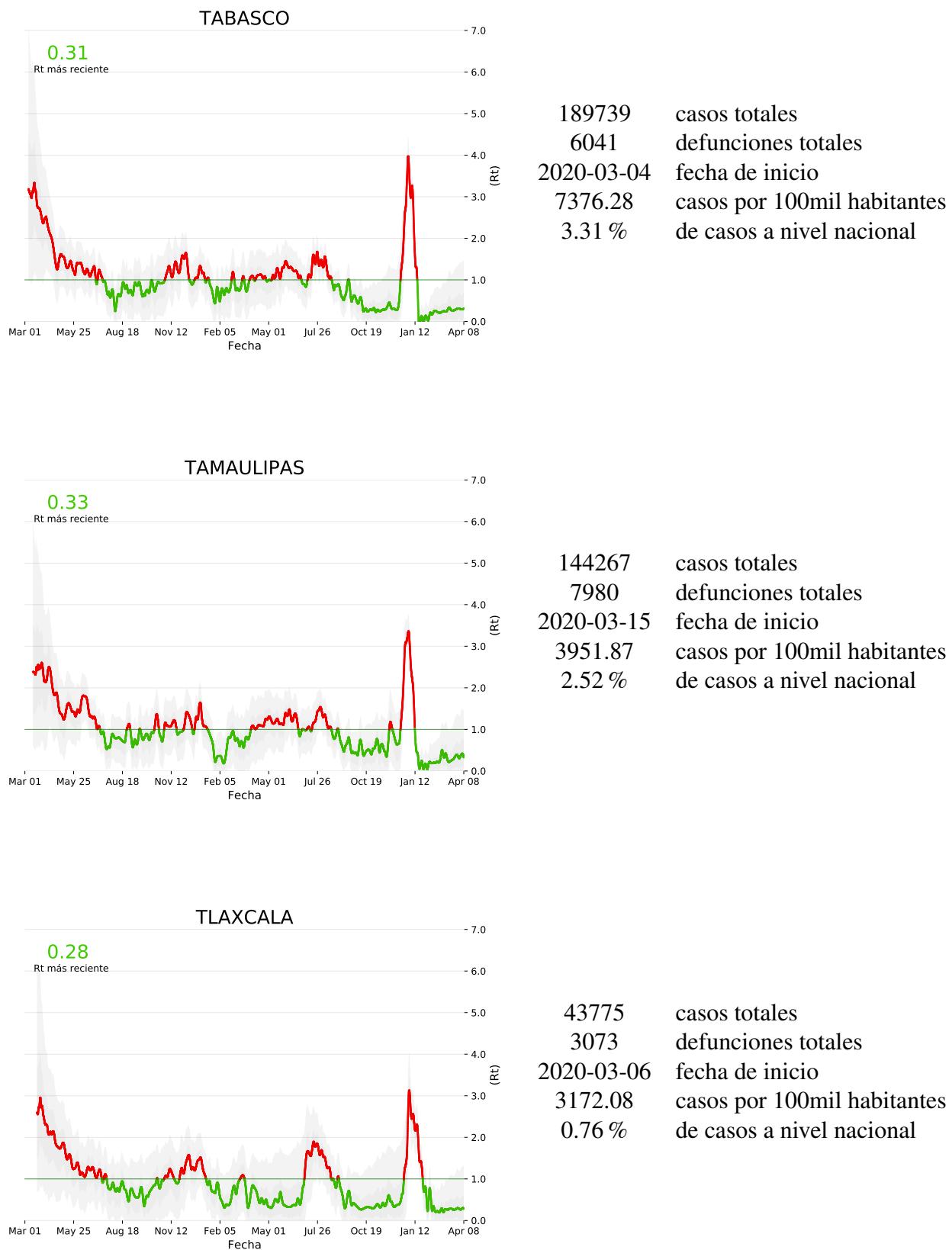


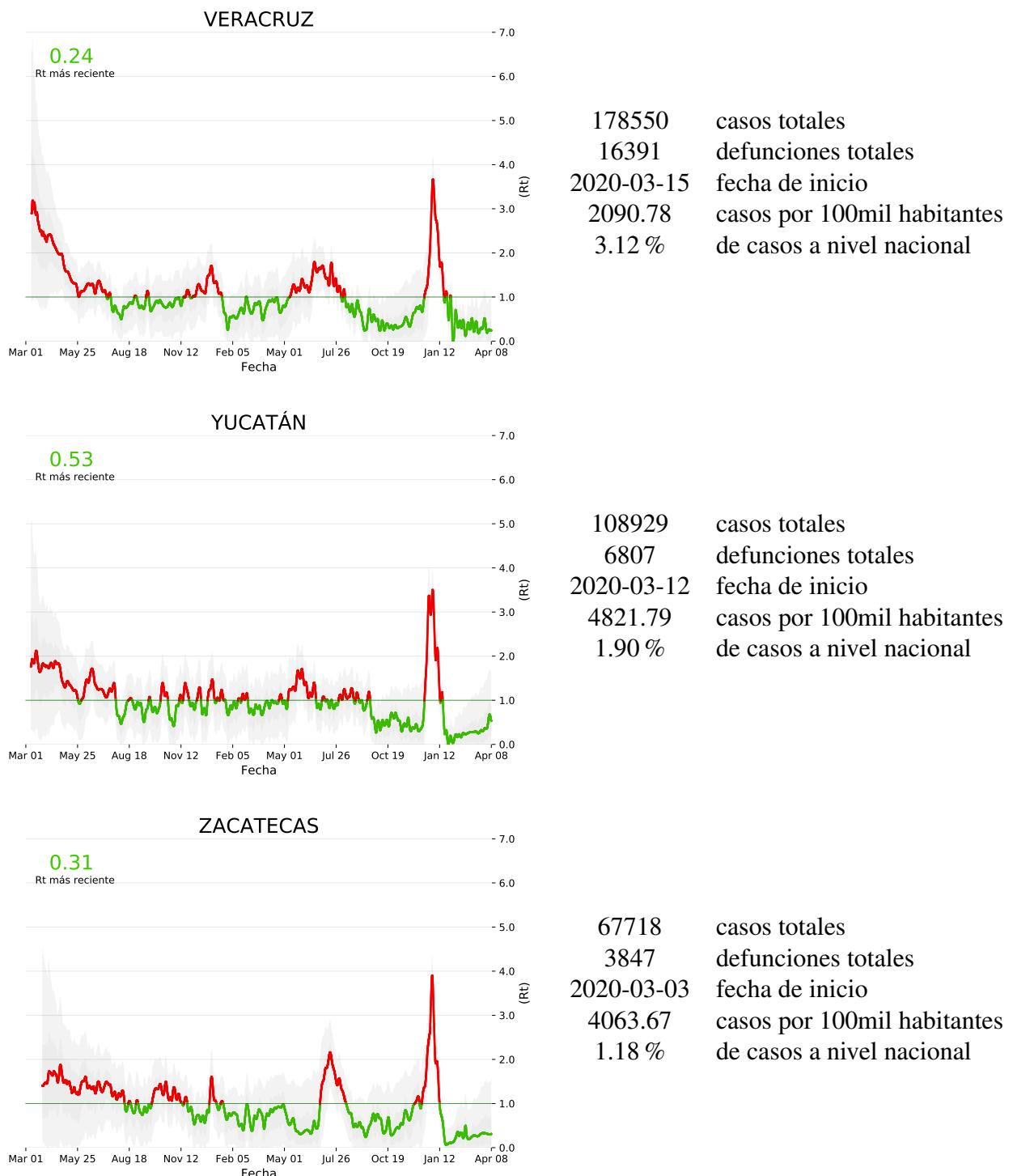
141925      casos totales  
 6197        defunciones totales  
 2020-03-10    fecha de inicio  
 6225.77     casos por 100mil habitantes  
 2.48 %      de casos a nivel nacional



91784      casos totales  
 4380        defunciones totales  
 2020-03-11    fecha de inicio  
 5326.19     casos por 100mil habitantes  
 1.60 %      de casos a nivel nacional



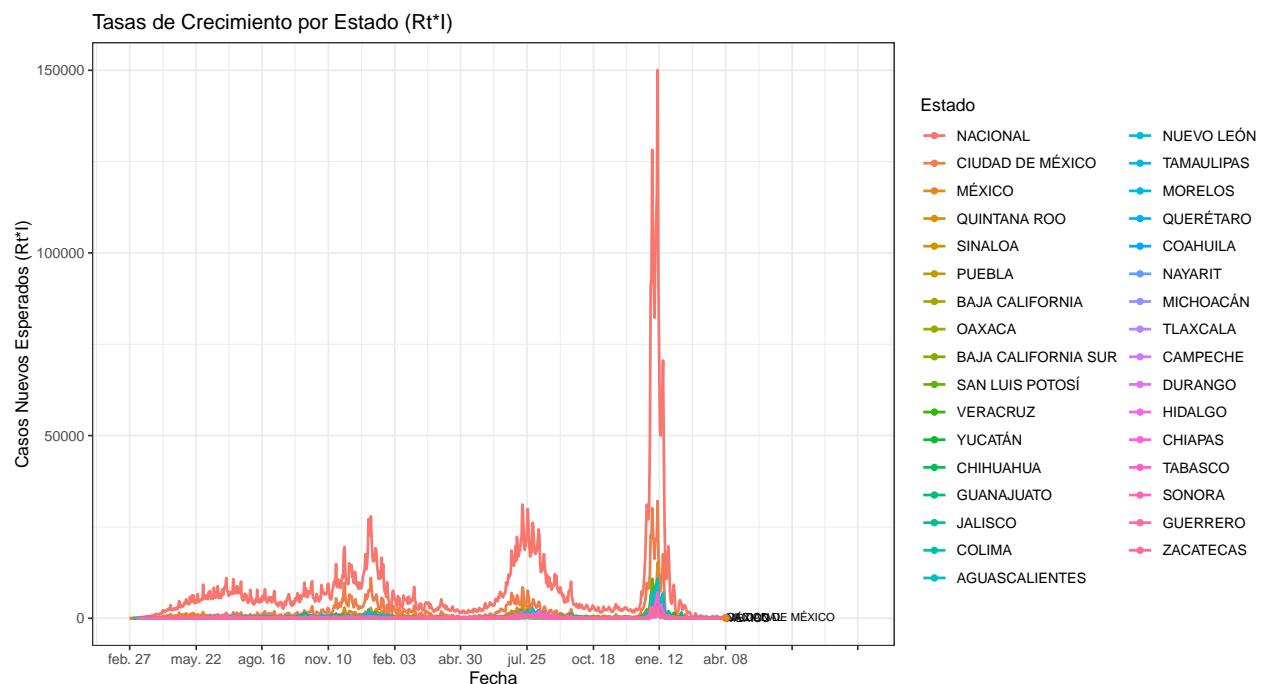




## 2.1 Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Estado

**Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 20 de Abril de 2022**

La figura 2.1 muestra la tasa de crecimiento ( $R_t * I$ ) a lo largo del tiempo, es decir, los casos nuevos esperados por día para la tasa  $R_t$  estimada y el número de casos nuevos registrados ese día ( $I$ ). Se muestra la comparación con la curva nacional (obtenida a partir de los datos por Estado) para observar la contribución de cada uno de los Estados a la tasa de crecimiento nacional.

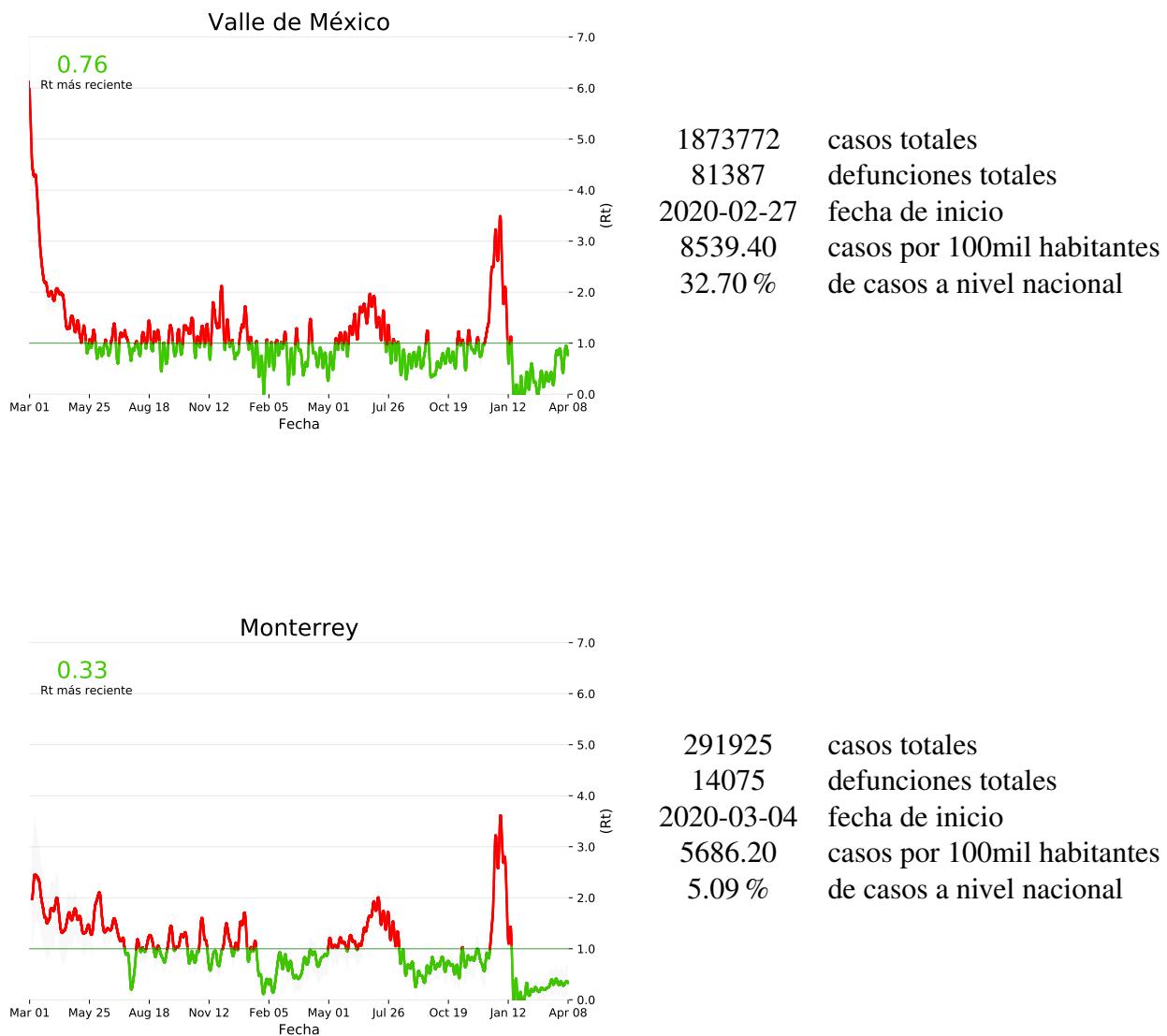


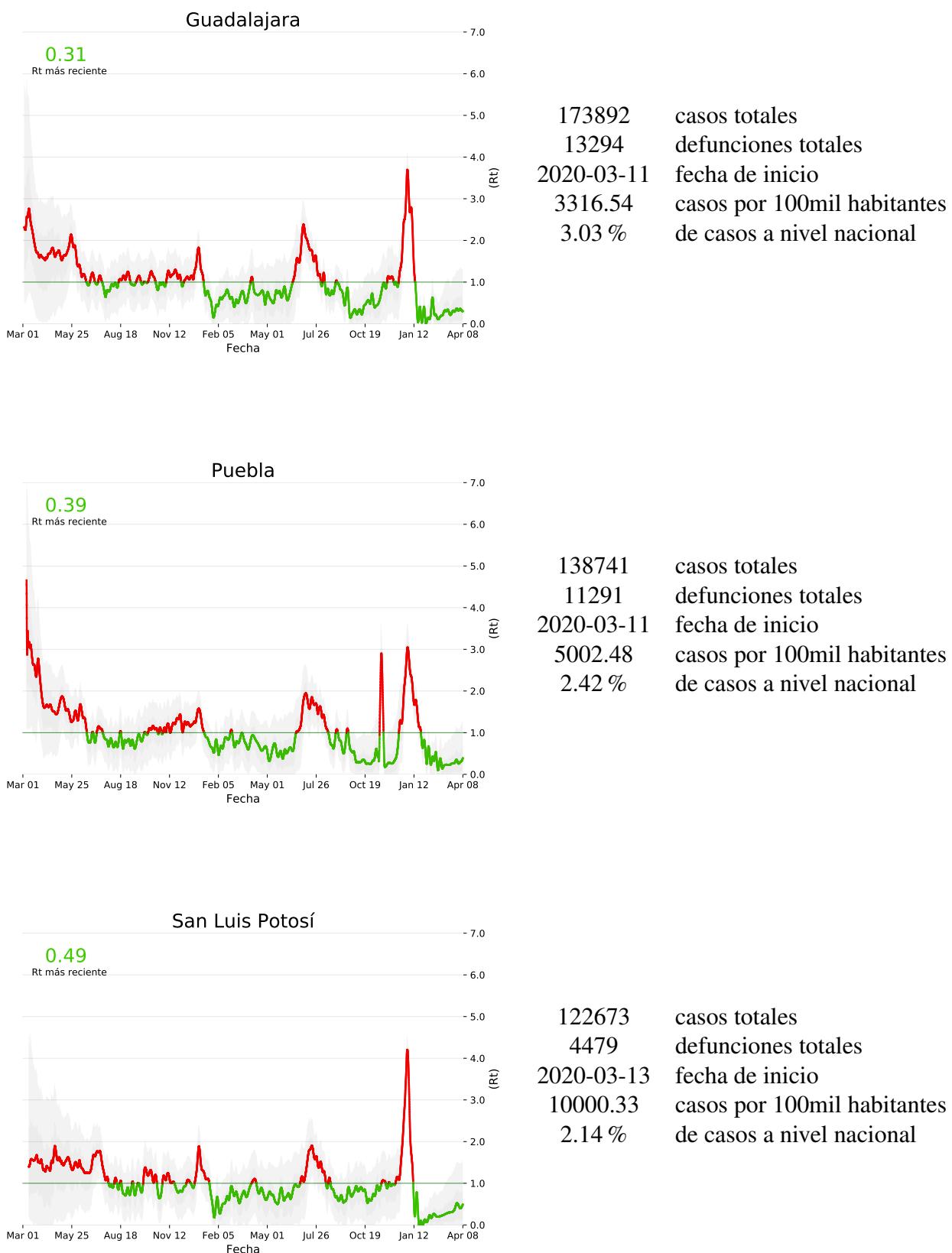
**Fig. 2.1:** Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Estado.

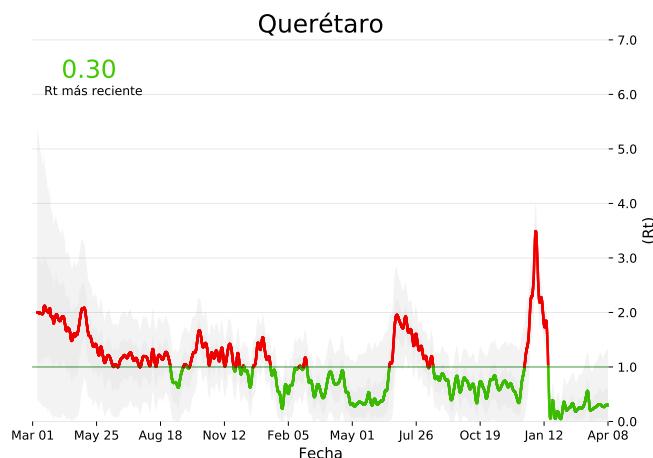
### **3. Estimaciones de $R_t$ por Zona Metropolitana**

**Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 20 de Abril de 2022**

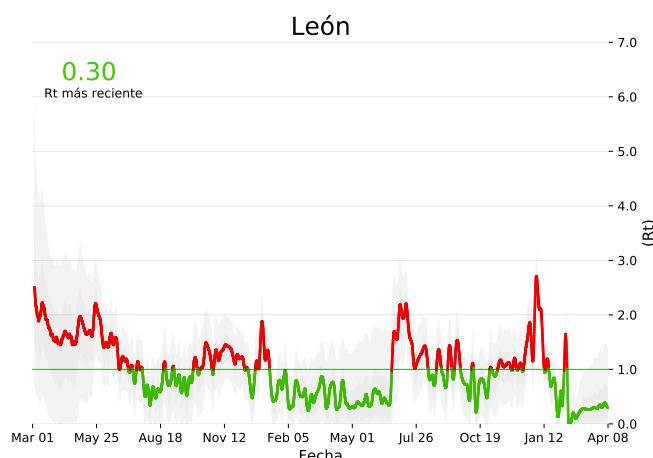
A continuación se muestran las gráficas del comportamiento de la tasa  $R_t$  a lo largo del tiempo para las 25 Zonas Metropolitanas con mayor número de casos de COVID-19. La fecha inicial se toma a partir de la cual existen datos suficientes para hacer la estimación, mientras que la fecha final corresponde al 08 de Abril de 2022.



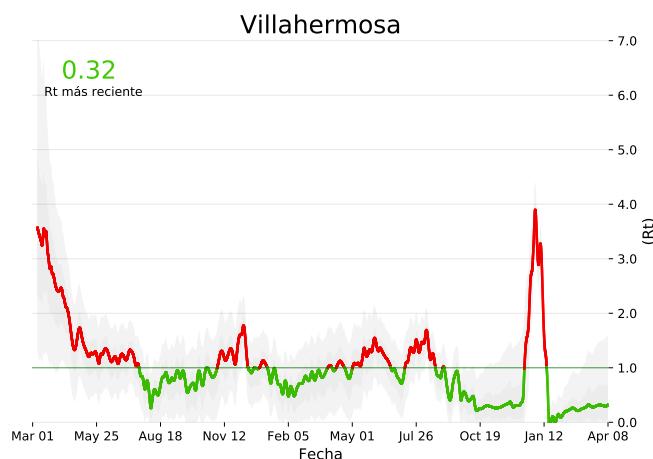




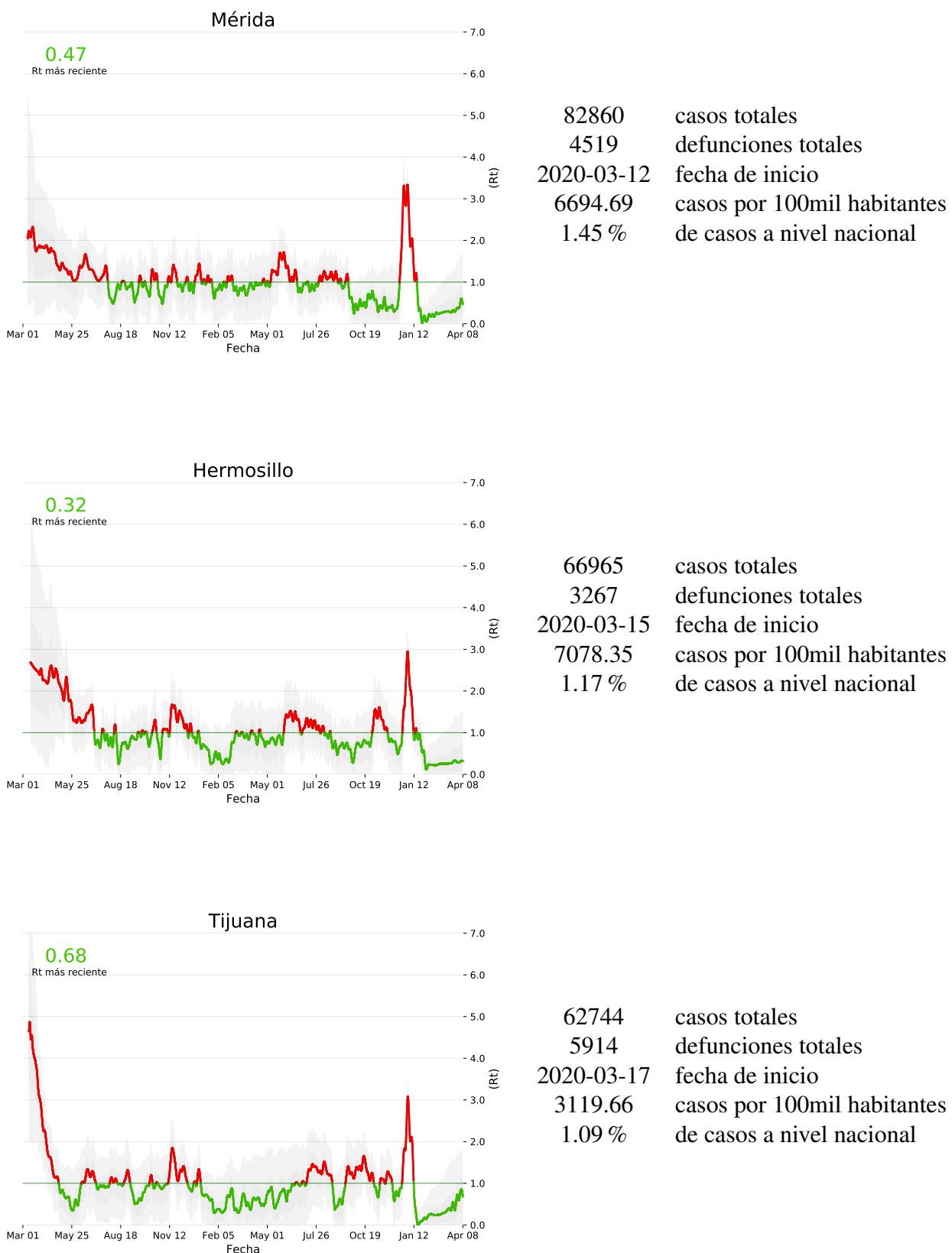
113798      casos totales  
4822      defunciones totales  
2020-03-10      fecha de inicio  
7698.41      casos por 100mil habitantes  
1.99 %      de casos a nivel nacional

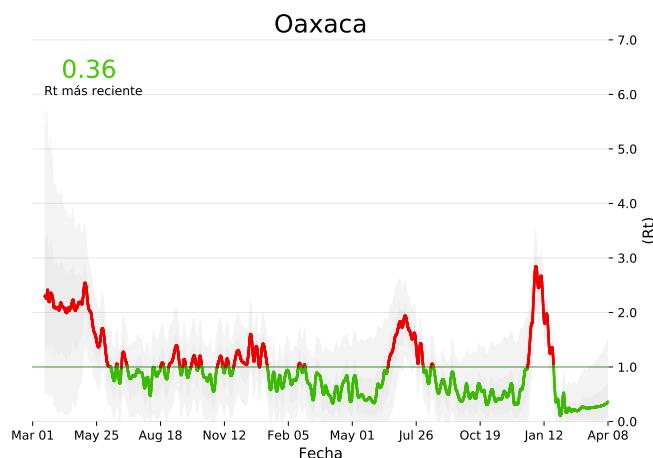


107794      casos totales  
5733      defunciones totales  
2020-03-01      fecha de inicio  
5731.80      casos por 100mil habitantes  
1.88 %      de casos a nivel nacional

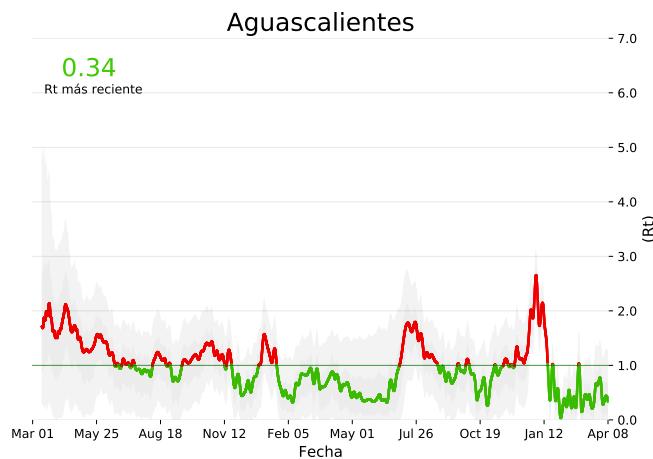


106888      casos totales  
2832      defunciones totales  
2020-03-04      fecha de inicio  
12025.20      casos por 100mil habitantes  
1.87 %      de casos a nivel nacional

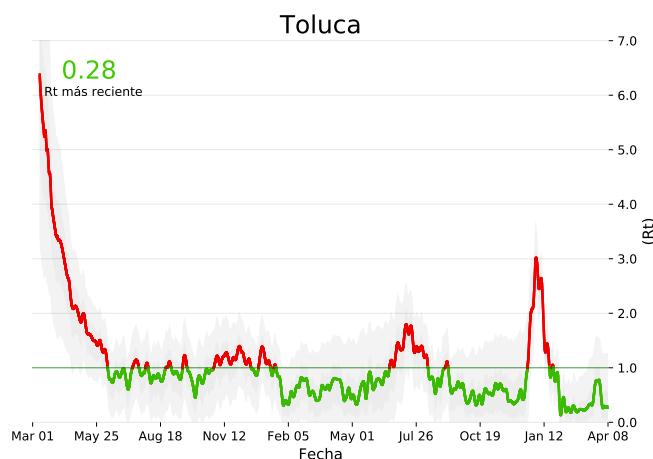




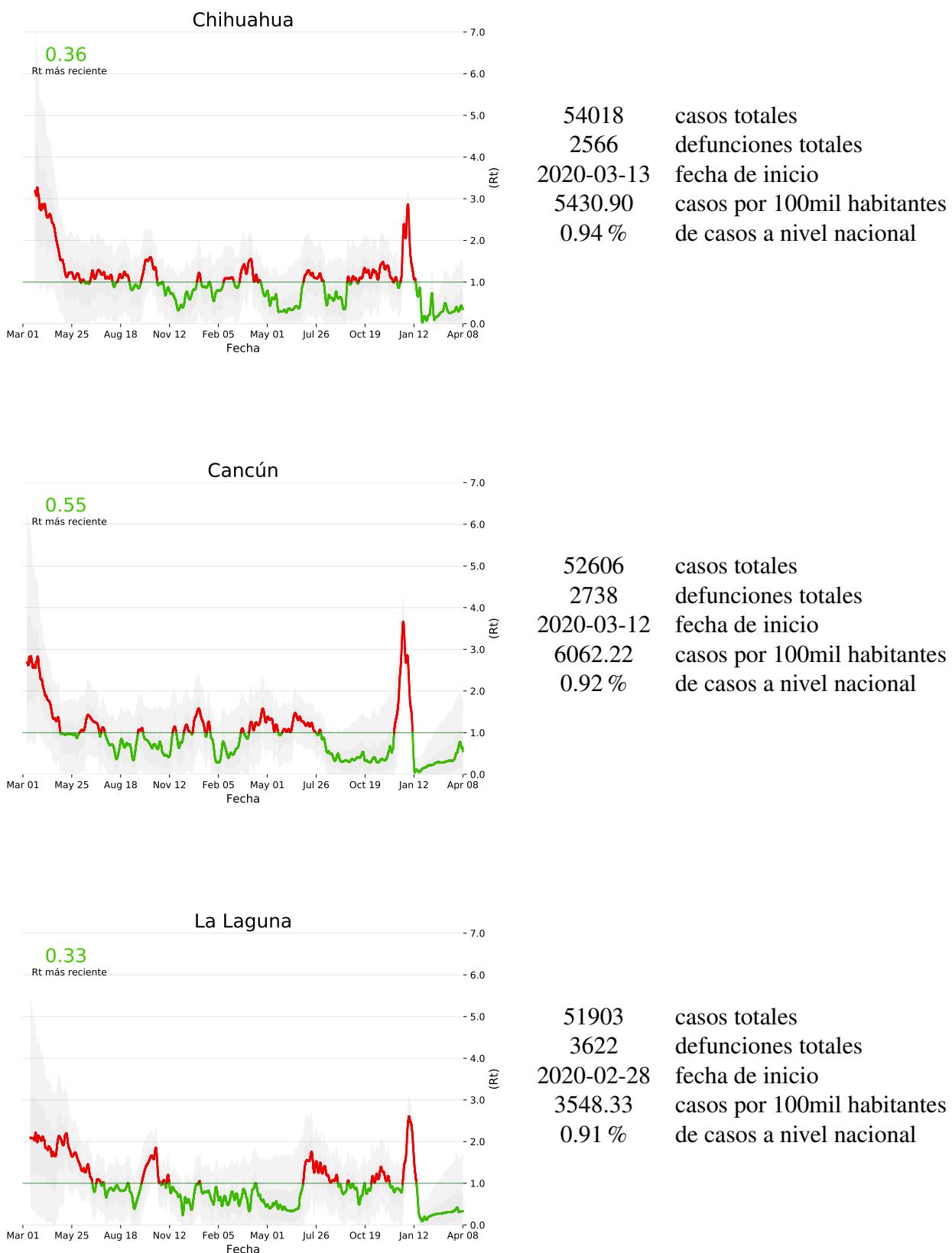
61160      casos totales  
2037      defunciones totales  
2020-03-13    fecha de inicio  
8752.01     casos por 100mil habitantes  
1.07 %      de casos a nivel nacional

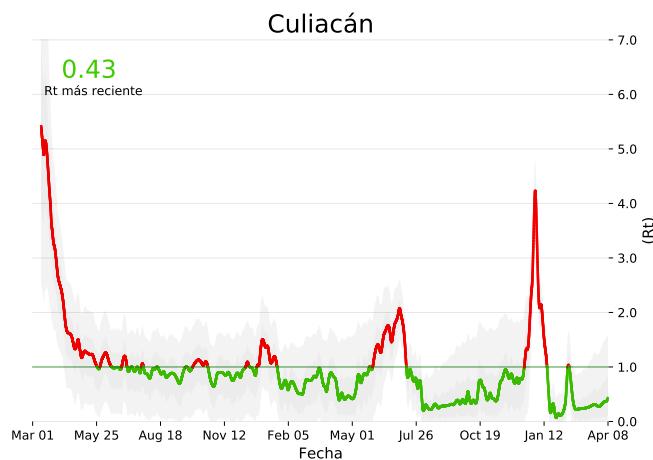


58897      casos totales  
3128      defunciones totales  
2020-03-14    fecha de inicio  
5149.56     casos por 100mil habitantes  
1.03 %      de casos a nivel nacional

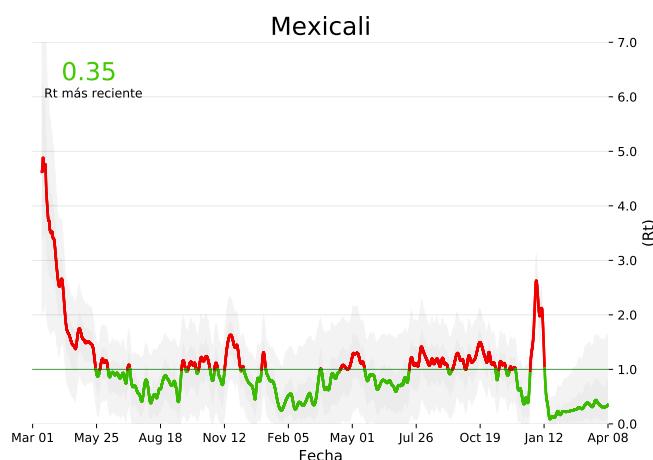


57288      casos totales  
6068      defunciones totales  
2020-03-03    fecha de inicio  
2409.26     casos por 100mil habitantes  
1.00 %      de casos a nivel nacional

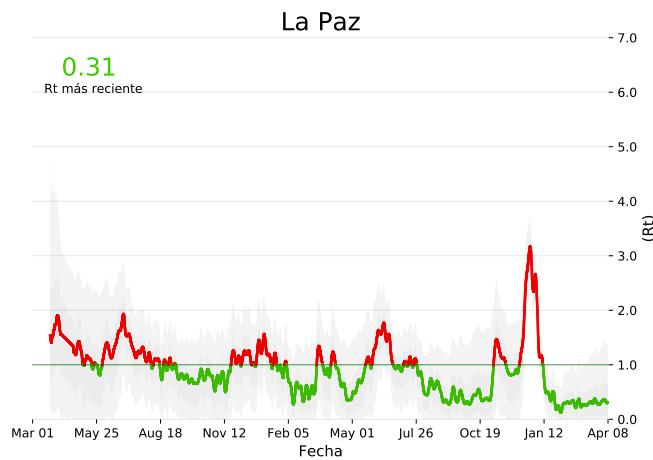




50932      casos totales  
 3450      defunciones totales  
 2020-03-17      fecha de inicio  
 5289.60      casos por 100mil habitantes  
 0.89 %      de casos a nivel nacional

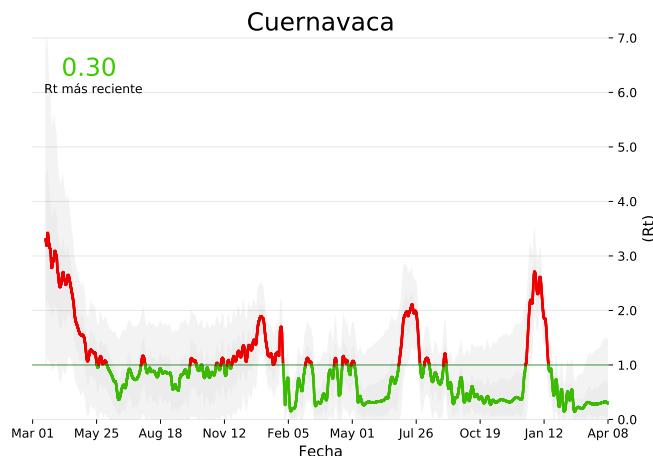


47647      casos totales  
 4348      defunciones totales  
 2020-03-11      fecha de inicio  
 4381.42      casos por 100mil habitantes  
 0.83 %      de casos a nivel nacional

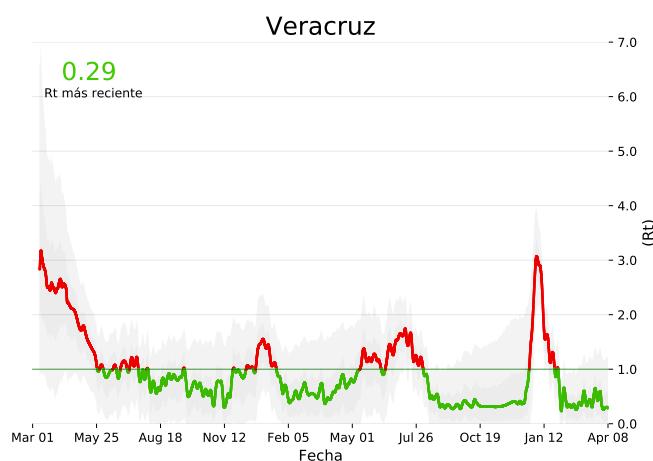


47065      casos totales  
 1078      defunciones totales  
 2020-03-26      fecha de inicio  
 15586.45      casos por 100mil habitantes  
 0.82 %      de casos a nivel nacional





41822      casos totales  
2627      defunciones totales  
2020-03-14    fecha de inicio  
3947.26     casos por 100mil habitantes  
0.73 %     de casos a nivel nacional

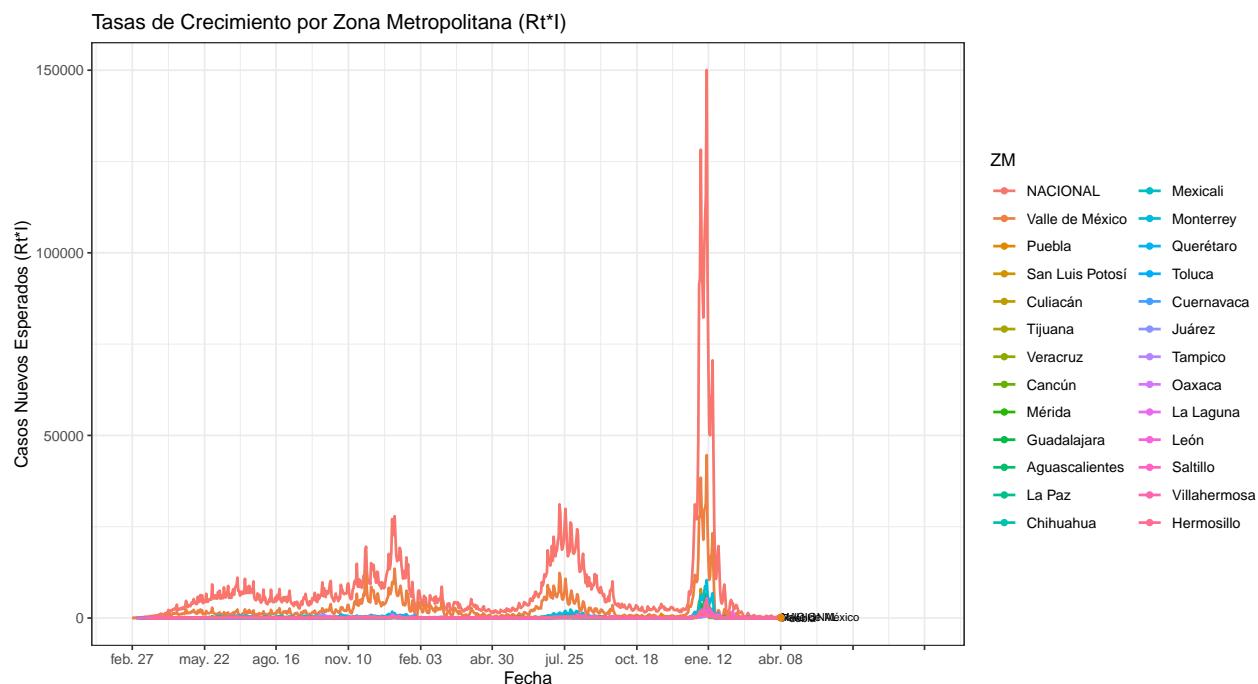


40520      casos totales  
3144      defunciones totales  
2020-03-15    fecha de inicio  
4236.44     casos por 100mil habitantes  
0.71 %     de casos a nivel nacional

### 3.1 Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Zona Metropolitana

**Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 20 de Abril de 2022**

La figura 3.1 muestra la tasa de crecimiento ( $R_t * I$ ) a lo largo del tiempo para Zonas Metropolitanas, es decir, los casos nuevos esperados por día para la tasa  $R_t$  estimada y el número de casos nuevos registrados ese día ( $I$ ). Se muestra la comparación con la curva nacional (obtenida a partir de los datos por Estado) para observar la contribución de cada una de las Zonas Metropolitanas a la tasa de crecimiento nacional.



**Fig. 3.1:** Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Zona Metropolitana.

## 4. Metodología de Estimación de $R_t$

## 4.1 Metodología para la Estimación del $R_t$ .

A continuación se resume la metodología utilizada para estimar el valor de la tasa de reproducción  $R_t$  cada día por Estados y Zonas Metropolitanas de la República Mexicana. La cual está basada en la propuesta del sitio *Estimating COVID-19's Rt in Real-Time* [1], que estima los valores de  $R_t$  para los Estados Unidos de América.

Esta tasa de reproducción es una medida de la rapidez con la que se transmite la enfermedad COVID-19, pues se refiere al número promedio de personas que son infectadas por una persona infecciosa. Si el valor de  $R_t$  es superior a 1.0, la enfermedad continúa su expansión, mientras que si es menor a 1.0 la expansión se está deteniendo.

### 4.1.1 Datos de entrada para la estimación

Los datos a partir de los cuales se estiman los valores de  $R_t$  corresponden a la información oficial provista por el Gobierno de México, a través de su portal de acceso abierto, respecto a los casos confirmados de COVID-19 en el país (ver el sitio).

Mediante estos datos se determina la serie de nuevos casos confirmados por día para cada uno de los estados, tomando como fecha el día de presentación de los síntomas de cada individuo. Se descartan los datos correspondientes a los últimos 7 días y se aplica un suavizado con promedio móvil ponderado. La siguiente gráfica muestra los nuevos casos diarios para la Ciudad de México hasta el 26 de abril, a manera de ejemplo.



### 4.1.2 Estimación de la tasa de reproducción efectiva $R_t$

Se estima la probabilidad a posteriori  $P(R_t|k)$  utilizando el Teorema de Bayes, donde  $t$  es el día y  $k$  es el número de casos nuevos de COVID-19 en ese día:

$$P(R_t|k) = \frac{P(k|R_t) \cdot P(R_t)}{P(k)} \quad (4.1)$$

Para la verosimilitud  $P(k|R_t)$  se propone una distribución Poisson:

$$P(k|R_t) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (4.2)$$

con parámetro  $\lambda = k_{t-1}e^{\gamma(R_{t-1})}$ , que depende del número de casos nuevos del día anterior y del parámetro  $\gamma = 1/12$ , pues el intervalo serial es de 12 días.

La probabilidad a priori  $P(R_t)$  se calcula a partir de la probabilidad a priori del día anterior  $P(R_{t-1})$ , asumiendo que  $P(R_t|R_{t-1})$  sigue una distribución normal centrada en  $R_{t-1}$ , es decir  $N(R_{t-1}, \sigma)$ . Para cada estado o zona metropolitana se selecciona el valor de  $\sigma$  que maximiza la verosimilitud de  $P(k|\sigma)$  para un rango de valores propuesto.

Para estimar la posterior  $P(R_t|k)$  del día  $t$ , se fija  $k$ , pues se conoce el número de nuevos casos en el día  $t$ , y se varía  $R_t$  en un rango propuesto entre 0 y 12. Se repite el proceso de manera iterativa para calcular la probabilidad posterior para cada día de la serie. La siguiente figura muestra las distribuciones posteriores diarias obtenidas para la Ciudad de México.



Para cada estado y zona metropolitana se seleccionó un valor de  $R_0$  inicial, a partir del cuál se inicia la estimación del  $R_t$ :

Estado	$R_0$	Zona Metropolitana	$R_0$
AGUASCALIENTES	1.6	Valle de México	7.0
BAJA CALIFORNIA	4.8	Monterrey	2.0
BAJA CALIFORNIA SUR	1.5	Guadalajara	2.3
CAMPECHE	1.8	Puebla	3.3
COAHUILA	2.1	San Luis Potosí	1.4
COLIMA	1.5	Querétaro	2.0
CHIAPAS	2.3	León	2.5
CHIHUAHUA	2.8	Villahermosa	3.6
CIUDAD DE MÉXICO	7.0	Mérida	2.1
DURANGO	1.4	Hermosillo	2.7
GUANAJUATO	2.2	Tijuana	4.8
GUERRERO	2.2	Oaxaca	2.3
HIDALGO	2.2	Aguascalientes	1.7
JALISCO	2.3	Toluca	6.5
MÉXICO	6.0	Chihuahua	3.2
MICHOACÁN	1.7	Cancún	2.7
MORELOS	2.8	La Laguna	2.1
NAYARIT	1.9	Culiacán	5.5
NUEVO LEÓN	2.2	Mexicali	4.8
OAXACA	1.9	La Paz	1.5
PUEBLA	3.1	Tampico	2.3
QUERÉTARO	1.7	Saltillo	2.1
QUINTANA ROO	2.5	Juárez	3.5
SAN LUIS POTOSÍ	1.4	Cuernavaca	3.3
SINALOA	5.0	Veracruz	3.0
SONORA	2.5		
TABASCO	3.2		
TAMAULIPAS	2.4		
TLAXCALA	2.6		
VERACRUZ	3.0		
YUCATÁN	1.8		
ZACATECAS	1.4		

Tabla 4.1

Finalmente para cada día se calculan los **intervalos de máxima densidad (HDI)** para el 50 % y el 90 %, así como el valor de máxima verosimilitud (ML), a partir de la posterior  $P(R_t|k)$ . La

siguiente tabla muestra los valores estimados para 5 días de la Ciudad de México, a manera de ejemplo.

	ML	Low_50	High_50	Low_90	High_90
date					
2020-04-22	0.81	0.59	0.92	0.40	1.19
2020-04-23	0.79	0.59	0.92	0.38	1.18
2020-04-24	0.80	0.57	0.91	0.38	1.19
2020-04-25	0.81	0.59	0.93	0.37	1.19
2020-04-26	0.82	0.62	0.96	0.38	1.21

## Referencias

- [1] Systrom K. (2020). Estimating COVID-19's Rt in Real-Time. Del sitio <https://github.com/k-sys/covid-19/blob/master/Realtime%20R0.ipynb>
- [2] Systrom K., Vladeck T. & Krieger M. (2020). Rt Covid-19. Del sitio <https://rt.live/>