



## CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN INTERNET DE LAS COSAS

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

### **Monitoreo y gestión remota de controladores de clima y riego**

**Autor:**

**Ing. Martín A. Brocca**

Director:

Mg. Ing. Juan Carlos Brocca

Jurados:

A ser designado

A ser designado

A ser designado

*Este trabajo fue realizado en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires,  
entre junio de 2022 y mayo de 2023.*



## *Resumen*

En la presente memoria se describe el diseño, desarrollo e implementación de un sistema de control y monitoreo de clima y riego para un invernadero de tipo hogareño. El trabajo se compone de una colección de sensores y actuadores basados en hardware de bajo costo y una plataforma de software de código abierto que permite automatizar el proceso y adaptarlo a diferentes cultivos.

Para completar este proyecto se utilizaron técnicas de selección e integración de circuitos, desarrollo de firmware, evaluación de software y diseño de automatizaciones.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>1. Introducción general</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	1
1.3. Estado del arte . . . . .	2
1.4. Objetivos y alcance . . . . .	5
<b>2. Introducción específica</b>	<b>7</b>
2.1. Tecnologías de comunicación . . . . .	7
2.1.1. Tecnologías Wi-Fi . . . . .	7
2.1.2. Protocolo MQTT . . . . .	7
2.1.3. Protocolo HTTP . . . . .	8
2.1.4. Protocolo SSL/TLS . . . . .	8
2.2. Componentes de hardware utilizado . . . . .	9
2.3. Tecnologías de software aplicadas . . . . .	9
2.4. Requerimientos . . . . .	9
<b>3. Diseño e implementación</b>	<b>11</b>
3.1. Arquitectura del sistema . . . . .	11
3.2. Detalle de los módulos de hardware . . . . .	11
3.3. Detalle del firmware desarrollado . . . . .	11
3.4. Selección y configuración del software . . . . .	11
3.5. Ciberseguridad del sistema . . . . .	11
<b>4. Ensayos y resultados</b>	<b>13</b>
4.1. Banco de pruebas . . . . .	13
4.2. Pruebas unitarias . . . . .	13
4.3. Pruebas de sistema . . . . .	13
4.4. Comparativa con el estado de arte . . . . .	13
<b>5. Conclusiones</b>	<b>15</b>
5.1. Resultados obtenidos . . . . .	15
5.2. Trabajo futuro . . . . .	15
<b>Bibliografía</b>	<b>17</b>



# Índice de figuras

1.1. Invernadero hogareño . . . . .	2
1.2. Invernadero inteligente controlado por IoT . . . . .	3
1.3. Sistema de control de irrigación de Growlink . . . . .	4
1.4. Sistema multisensor de Grodan . . . . .	4
2.1. Pila de protocolos para IoT. . . . .	7
2.2. Arquitectura del protocolo MQTT. . . . .	8
2.3. Proceso de autenticación de dos vías de SSL. . . . .	9





# Índice de tablas

1.1. Análisis del estado del arte . . . . .	4
---	---



# Capítulo 1

## Introducción general

En este capítulo se introducen conceptos asociados al uso de Internet de las Cosas (IoT) en invernaderos la motivación del cliente y cuál es el estado del arte. Asimismo, se explican los objetivos y el alcance establecidos.

### 1.1. Introducción

El término Internet de las Cosas (IoT) se refiere a escenarios en los que la conectividad de red y la capacidad de cómputo se extienden a objetos, sensores y artículos de uso diario que habitualmente no se consideran computadoras, permitiendo que estos dispositivos generen, intercambien y consuman datos con una mínima intervención humana [1]. IoT tiene una amplia variedad de campos de aplicación, entre los cuales se destaca la agricultura inteligente aplicada a invernaderos.

Los invernaderos modernos son sistemas de cultivo intensivo diseñados para alcanzar una alta eficiencia y productividad. Debido a su capacidad para mantener las condiciones ambientales en niveles óptimos o subóptimos, facilitan la producción de plantas a lo largo de todo el año en forma independiente a las condiciones climáticas externas [2].

La aplicación de IoT a invernaderos ha demostrado una mejora sustancial en la eficiencia de la gestión de los cultivos al mismo tiempo que ha logrado acelerar la producción y reducir sus costos [3]. Además de las ventajas mencionadas, los invernaderos pueden impactar de forma positiva a los entusiastas de la jardinería, ya que proporcionan beneficios tanto físicos como anímicos especialmente durante las temporadas invernales o de baja temperatura [4].

### 1.2. Motivación

El cliente de este proyecto acaba de comenzar su jubilación y decidió comenzar una nueva vida en una finca rural. Su intención es convertir la propiedad en una residencia sustentable, capaz de producir diferentes tipos de plantas: por un lado, hortalizas para abastecer el consumo familiar y por otro, especies de árboles para reforestación.

Para lograrlo con mínima intervención humana en el proceso, surge la necesidad de instalar un invernadero que automatice el control de los cultivos. Frente a la diversidad de especies de plantas a cultivar, las condiciones climáticas y de riego deben ser flexibles para adaptarse a cada siembra.

En la figura 1.1 se observa un vivero hogareño típico de producción y dimensiones similares al propuesto.



FIGURA 1.1. Invernadero hogareño<sup>1</sup>.

### 1.3. Estado del arte

Los invernaderos son estructuras diseñadas para controlar y proteger a las plantas del clima y otros factores ambientales adversos. Tradicionalmente, la temperatura, humedad e iluminación se controlaban de forma manual, lo que requería una gran cantidad de mano de obra y recursos.

Sin embargo, debido a los avances tecnológicos se ha popularizado el desarrollo de invernaderos capaces de ajustar las condiciones ambientales mediante el uso de sensores, actuadores y controladores. Estos dispositivos responden en función de configuraciones preprogramadas o a partir de datos en tiempo real.

Así el despliegue de este tipo de sistemas, denominados invernaderos inteligentes, se ha extendido enormemente en los últimos años debido a la eficiencia obtenida durante la producción y al incremento en la resiliencia de los cultivos [5].

Algunas posibles aplicaciones de IoT en viveros incluyen:

- Monitoreo y control del clima: distintos sensores miden la temperatura, humedad, iluminación y otros factores ambientales en el invernadero, para que luego diferentes actuadores automáticos ajusten el clima y creen las condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas.
- Riego a demanda: la medición continua de la humedad del suelo permite activar sistemas de riego automatizados para mantener los niveles óptimos de humedad. Se logra así reducir el desperdicio de agua y disminuir los costos asociados.
- Seguimiento del crecimiento de las plantas: los sensores IoT pueden medir el crecimiento de las plantas y proporcionar información útil para la gestión del cultivo. Esto puede ayudar a identificar problemas de crecimiento temprano y a tomar medidas que eviten problemas mayores a futuro.

---

<sup>1</sup>Imagen bajo licencia de <https://www.istockphoto.com/>

- Control de plagas y enfermedades: monitorear sus niveles en el vivero y activar sistemas de control cuando se detecten problemas ayuda a reducir el uso de pesticidas y otros productos químicos.
- Fertirrigación: el sistema puede administrar fertilizantes o nutrientes al suelo de forma optimizada y precisa a través del riego, en base a configuraciones acordes a la plantación en curso o mediante sensores que midan las características del agua entre otras, pH o conductividad eléctrica.
- Automatización de tareas: los sistemas IoT pueden automatizar muchas tareas en el vivero, como la siembra, el trasplante y la recolección de plantas. Esto puede reducir los costos de mano de obra y mejorar la eficiencia de la producción.

En la figura 1.2 se representa un invernadero inteligente con sus respectivos sensores y actuadores.

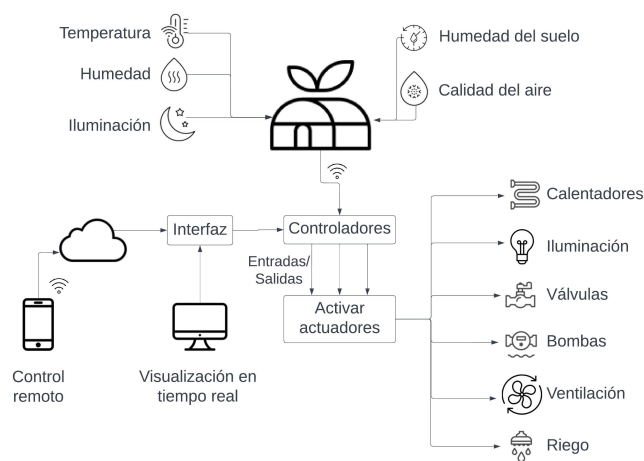


FIGURA 1.2. Invernadero inteligente controlado por IoT<sup>2</sup>.

En el mercado internacional se encuentran diferentes proveedores que ofrecen soluciones para el desarrollo de invernaderos inteligentes. A la hora de comparar distintas opciones es necesario considerar los niveles de automatización requeridos, la facilidad de uso y las opciones de personalización. Adicionalmente, se debe considerar el costo y la compatibilidad con la infraestructura existente.

En la tabla 1.1 se observa una breve comparación entre los principales proveedores comerciales de servicios. Allí se observa que en general las soluciones presentadas ofrecen características similares siendo el costo el mayor diferenciador.

A manera de ejemplo, algunas soluciones comerciales ofrecen kits que pueden costar más de USD 200 por sensor, con gastos adicionales asociados al transporte y almacenamiento de datos. De esta forma, las redes inalámbricas de sensores pueden llegar a requerir presupuestos mayores a USD 10 000 por invernadero [10]. Las figuras 1.3 y 1.4 muestran diferentes componentes de las soluciones comerciales.

<sup>2</sup>Imagen adaptada de *Internet of Things Empowered Smart Greenhouse Farming* [6].

<sup>3</sup>Imagen bajo licencia de <https://www.growlink.com/>

<sup>4</sup>Imagen bajo licencia de <https://www.grodan.com/>

TABLA 1.1. Análisis del estado del arte.

Funcionalidad	Argus Controls [7]	Grodan [8]	Growlink [9]
Gestión de clima	Sí	Sí	Sí
Control de riego	Sí	Sí	Sí
Fertirrigación	Sí	Sí	Sí
Gestión de energía	No	Sí	Si
Tamaño de mercado	Grande	Grande	Pequeño
Costo	\$\$\$\$	\$\$\$	\$\$

FIGURA 1.3. Sistema de control de irrigación de Growlink<sup>3</sup>.

Una solución alternativa es utilizar kits de IoT los provistos por Arduino[11], que es una plataforma de hardware y software de código abierto. Por otro lado, es necesario contar con una comunidad de usuarios que colaboren en el proceso de desarrollo. No obstante, para usarlos de manera efectiva se requieren conocimientos de programación y electrónica, lo que los hace inaccesibles para el cultivador promedio [10].

FIGURA 1.4. Sistema multisensor de Grodan<sup>4</sup>.

## 1.4. Objetivos y alcance

El propósito de este trabajo es el desarrollo de una plataforma capaz de controlar el clima y riego de un invernadero mediante el uso de sensores y actuadores. Estos dispositivos se comunican con una aplicación instalada en un servidor local que administra los parámetros y las alarmas del sistema.

Durante el proyecto se construyó un prototipo completo de invernadero con los siguientes elementos:

- Aplicación para el monitoreo, control de dispositivos, gestión de alarmas y automatización.
- Control de usuarios, permisos y accesos a la plataforma.
- Interfaz gráfica para acceso y control de la plataforma.
- Análisis, investigación y elección del hardware para los sensores y actuadores.

El trabajo no incluyó:

- Instalación en sitio de los sistemas desarrollados.
- Implementación de métodos de control basados en condiciones climatológicas externas.
- Desarrollo o implementación de modelos analíticos o predictivos de las condiciones del vivero.
- Diseño o instalación de conexiones que no sean por Wi-Fi (LTE/5G).





## Capítulo 2

# Introducción específica

En este capítulo se describen las tecnologías, herramientas y protocolos utilizados para la realización del trabajo.

### 2.1. Tecnologías de comunicación

A continuación se describen los principales protocolos empleados en el trabajo. En la figura 2.2 se observa su posicionamiento en la pila de protocolos para IoT.

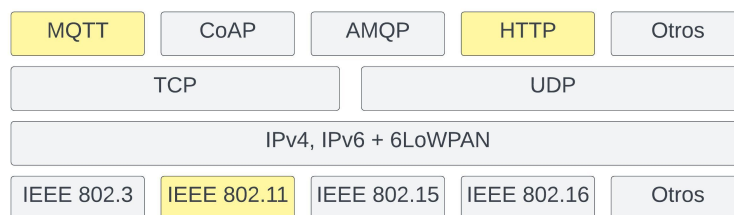


FIGURA 2.1. Pila de protocolos para IoT<sup>1</sup>.

#### 2.1.1. Tecnologías Wi-Fi

El estándar IEEE 802.11 para redes inalámbricas de área local (WLAN) es conocido comercialmente como Wi-Fi. Este estándar presenta dos modos de operación [13]

- Infraestructura: uno o más *access points* (AP) actúan como puente entre la red cableada y la red inalámbrica. Todas las comunicaciones entre los dispositivos conectados a la red, se realizan a través de los APs.
- Ad-hoc: cada nodo puede realizar una conexión directa con otro, sin necesidad de un AP central. Para lograr esto, los nodos se organizan en una red donde todos son capaces de enrutar los paquetes.

#### 2.1.2. Protocolo MQTT

El protocolo MQTT fue desarrollado en 1999 con el objetivo principal de crear un protocolo muy eficiente desde el punto de vista del uso del ancho de banda y de muy bajo consumo de energía. Por estas razones es adecuado para el uso en IoT [14].

<sup>1</sup>Gráfico creado en base a una imagen tomada de: [12].

El protocolo MQTT se basa en el paradigma de publicación-suscripción. Este paradigma desvincula un cliente que publica un mensaje o publicador de otros clientes que reciben el mensaje o suscriptores. Sumado a esto, MQTT es un protocolo de mensajería asíncrono, lo que significa que no frena al cliente mientras espera por el mensaje.

Un componente principal del protocolo es el *broker*, su función principal es la de recibir los mensajes de los publicadores y enviarlos a los clientes suscriptores. Para realizar esta tarea, el *broker* utiliza temas o *topics* para filtrar a los clientes que recibirán el mensaje. De esta manera, el *topic* es un canal virtual que conecta a los publicadores con sus suscriptores [14].

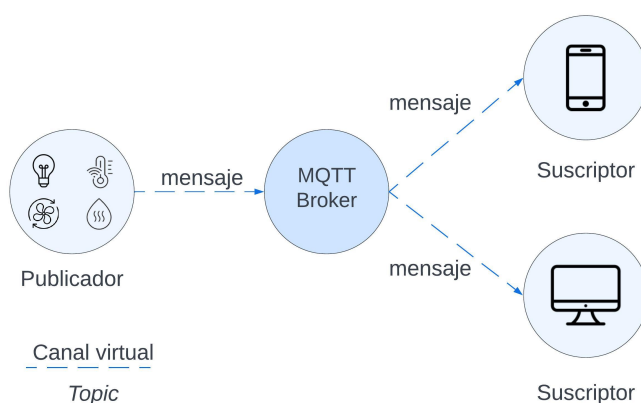


FIGURA 2.2. Arquitectura del protocolo MQTT<sup>2</sup>.

### 2.1.3. Protocolo HTTP

El *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP)[15] es un protocolo utilizado en la web para el desarrollo de aplicaciones basado en el paradigma cliente-servidor mediante un modelo de *request/response*. En los últimos tiempos se ha asociado a HTTP con la arquitectura REST (*Representational State Transfer*)[16] para facilitar la interacción entre distintas entidades sobre servicios basados en red. Esta asociación permite que los dispositivos interactúen mediante funciones estandares de CRUD (*create, read, update, delete*)[17]. Las funciones de CRUD son mapeadas a los métodos Post, Get, Put y Delete de HTTP respectivamente [18].

### 2.1.4. Protocolo SSL/TLS

*Secure Socket Layer/Transport Layer Security* (SSL/TLS) [19] es un protocolo criptográfico que proporciona seguridad de extremo a extremo de los datos enviados entre aplicaciones a través de Internet. TLS evolucionó a partir de *Secure Socket Layers* (SSL), que fue desarrollado originalmente por Netscape Communications Corporation en 1994 para proteger las sesiones web. SSL 1.0 nunca se lanzó públicamente, mientras que SSL 2.0 fue reemplazado rápidamente por SSL 3.0 en el que se basa TLS.

<sup>2</sup>Gráfico creado en base a una imagen tomada de: [14].

Cabe señalar que TLS no protege los datos en los sistemas finales, simplemente asegura la entrega segura de datos a través de Internet, evitando posibles escuchas y/o alteración del contenido. TLS normalmente se implementa sobre TCP [20] para cifrar los protocolos de la capa de aplicación, como por ejemplo sobre HTTP.

TLS utiliza una combinación de criptografía simétrica y asimétrica, ya que proporciona un buen compromiso entre rendimiento y seguridad cuando se transmiten datos de forma segura [21]. Para mayor seguridad es deseable que un cliente que se conecta a un servidor pueda validar la veracidad de la clave pública del servidor. Esto normalmente se lleva a cabo utilizando un certificado digital X.509 [22] emitido por un tercero de confianza conocido como Autoridad Certificadora (CA) que afirma la autenticidad de la clave pública. En algunos casos, un servidor puede usar un certificado autofirmado en el que el cliente debe confiar explícitamente [21].

En la figura 2.3 se detalla el esquema de autenticación mutua entre dos dispositivos mediante la verificación del certificado presentado.

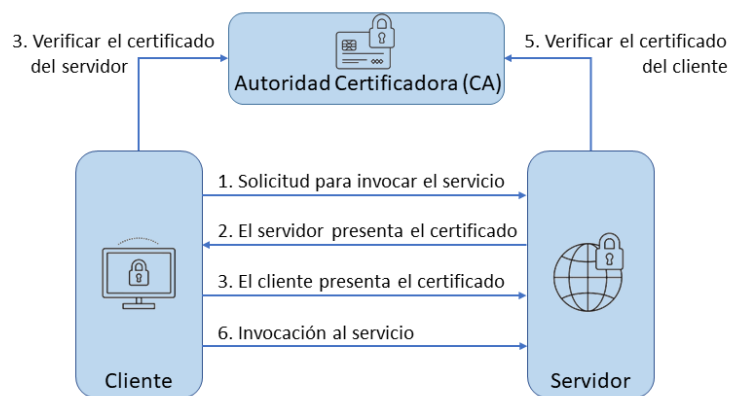


FIGURA 2.3. Proceso de autenticación de dos vías de SSL<sup>3</sup>.

## 2.2. Componentes de hardware utilizado

## 2.3. Tecnologías de software aplicadas

## 2.4. Requerimientos

<sup>3</sup>Gráfico creado en base a una imagen tomada de: <https://www.codit.eu/blog/configuring-two-way-ssl-authentication-part-1>.



## Capítulo 3

# Diseño e implementación

En este capítulo se presentan los detalles del diseño de los nodos sensores y actuadores que conforman el trabajo, como así también los de la implementación de la aplicación Thingsboard.

- 3.1. Arquitectura del sistema**
- 3.2. Detalle de los módulos de hardware**
- 3.3. Detalle del firmware desarrollado**
- 3.4. Selección y configuración del software**
- 3.5. Ciberseguridad del sistema**



## Capítulo 4

# Ensayos y resultados

En este capítulo se explica la metodología de pruebas aplicada tanto a los componentes individuales como al sistema implementado, finalizando con una comparativa con el estado del arte.

### 4.1. Banco de pruebas

### 4.2. Pruebas unitarias

### 4.3. Pruebas de sistema

### 4.4. Comparativa con el estado de arte





## Capítulo 5

# Conclusiones

En este capítulo se muestran las conclusiones sobre el trabajo realizado. A su vez se presentan algunas modificaciones o mejoras como posible trabajo futuro

### **5.1. Resultados obtenidos**

### **5.2. Trabajo futuro**

Acá se indica cómo se podría continuar el trabajo más adelante.



# Bibliografía

- [1] Scott Eldridge y Lyman Chapin Karen Rose. «The Internet of Things: An Overview». En: (2015).
- [2] Krishna Nemali. «History of Controlled Environment Horticulture: Greenhouses». En: *HortScience* 57.2 (2022), págs. 239 -246. DOI: [10.21273/HORTSCI16160-21](https://doi.org/10.21273/HORTSCI16160-21). URL: <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/57/2/article-p239.xml>.
- [3] Chrysanthos Maraveas y Thomas Bartzanas. «Aplicación de internet de las cosas (IoT) para entornos de invernadero optimizados». En: *Magna Scientia UCEVA* 2 (dic. de 2022), págs. 253-268. DOI: [10.54502/msuceva.v2n2a11](https://doi.org/10.54502/msuceva.v2n2a11).
- [4] John W. Bartok. *Greenhouses for Homeowners and Gardeners*. Natural Resource, Agriculture, y Engineering Service (NRAES), 2000-06.
- [5] Intel. ¿Qué son los invernaderos inteligentes? <https://agrofacto.com/invernaderos-inteligentes/m>. 2022. (Visitado 20-03-2023).
- [6] Rakiba Rayhana, Gaozhi Xiao y Zheng Liu. «Internet of Things Empowered Smart Greenhouse Farming». En: *IEEE Journal of Radio Frequency Identification* 4.3 (2020), págs. 195-211. DOI: [10.1109/JRFID.2020.2984391](https://doi.org/10.1109/JRFID.2020.2984391).
- [7] Argus Controls. <https://arguscontrols.com/>. (Visitado 20-03-2023).
- [8] Grodan. <https://www.grodan.com/>. (Visitado 20-03-2023).
- [9] Growlink. <https://www.growlink.com/>. (Visitado 20-03-2023).
- [10] Chet Udell y Alan Dennis Lloyd Nackley. <https://diggermagazine.com/the-smart-greenhouse/>. 2020. (Visitado 20-03-2023).
- [11] Arduino. <https://www.arduino.cc/>. (Visitado 20-03-2023).
- [12] Nitin Naik. «Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP». En: *2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*. 2017, págs. 1-7. DOI: [10.1109/SysEng.2017.8088251](https://doi.org/10.1109/SysEng.2017.8088251).
- [13] Shanna L. «Comparative Analysis of Infrastructure and Ad-Hoc Wireless Networks». En: *ITM Web of Conferences* 25, 01009 (2019).
- [14] [www.survivingwithandroid.com](http://www.survivingwithandroid.com). <https://www.survivingwithandroid.com/mqtt-protocol-tutorial/>. (Visitado 20-03-2023).
- [15] The Internet Society. *Hypertext Transfer Protocol – HTTP/1.1*. RFC. URL: [\url{https://www.ietf.org/rfc/rfc2616.txt}](https://www.ietf.org/rfc/rfc2616.txt) (visitado 20-03-2023).
- [16] Roy Thomas Fielding. *Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures*. Inf. téc. 2000. Cap. Chapter 5: Representational State Transfer (REST).
- [17] Jasenka Dizdarević et al. «A Survey of Communication Protocols for Internet of Things and Related Challenges of Fog and Cloud Computing

- Integration». En: *ACM Comput. Surv.* 51.6 (ene. de 2019). ISSN: 0360-0300. DOI: [10.1145/3292674](https://doi.org/10.1145/3292674). URL: <https://doi.org/10.1145/3292674>.
- [18] Dimitrios Glaroudis, Athanasios Iossifides y Periklis Chatzimisios. «Survey, comparison and research challenges of IoT application protocols for smart farming». En: *Computer Networks* 168 (2020), pág. 107037. ISSN: 1389-1286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.107037>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128619306942>.
- [19] E. Rescorla T. Dierks. *The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.2*. RFC. 2008. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5280>.
- [20] J. Postel. *Transmission Control Protocol*. RFC 793. Internet Engineering Task Force, 1981, pág. 85. URL: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc793.txt>.
- [21] Internet Society. «TLS Basics». En: (). URL: <https://www.internetsociety.org/deploy360/tls/basics/>.
- [22] D. Cooper et. al. *Internet X.509 Public Key Infrastructure Certificate and Certificate Revocation List (CRL) Profile*. RFC. 2008. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5280>.